

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

DISEÑO DE UN MODULO PARA LA
ENSEÑANZA DE LA CINEMÁTICA
Y DINÁMICA DE LAS GALAXIAS
COMO INTRODUCCIÓN A LA
TEORÍA DE LA MATERIA OSCURA

TESIS PRESENTADA POR CARLA VIVIANA MONTAÑO BALLÉN

DIRIGIDA POR:

IGNACIO ALBERTO MONROY CAÑON

CAMILO DELGADO CORREAL

PARA OBTENER EL GRADO DE LICENCIADA EN FÍSICA

2016

Departamento de Física

Dedico este trabajo principalmente a Dios, que cada día me llena de fortaleza para seguir perseverando con paciencia y sabiduría, para superar cada obstáculo y conseguir el éxito en cada meta trazada.

Al ser más importante que Dios ha puesto en mi camino, Mi hijo Camilo, porque al llegar a mi vida la lleno del más puro y grande amor de madre, su presencia en mi vida hace que cada día luche más por conseguir mis metas y ser el mejor ejemplo para él.

A mi Madre que siempre ha estado a mi lado apoyándome en todas mis decisiones, a mi padre que desde el cielo me envió a un maravilloso hombre para que ocupara su lugar de padre en mi corazón y me diera el más grande apoyo y el mejor ejemplo a seguir.


A mis hermanos que amo con todo mi corazón y de una u otra manera siempre están apoyándome cada día.

Mis abuelitos que aunque no están conmigo de cuerpo presente, se que desde el cielo me cuidan.

Al hombre más especial que llevo a mi vida Eder, por siempre estar a mi lado apoyándome con amor, paciencia y comprensión, haciendo que con cada detalle vea lo maravilloso de la vida.

Mis grandes amigos Eduardo, Gus, Ingrid, no saben lo agradecida que estoy con Dios por haberlos hecho parte de este logro tan importante para mí.


A los profesores de la UPN, en especial al profesor Alberto Monroy, por la paciencia y dedicación a su labor.

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <small>Escuela de Pedagogía</small>	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 1 de 4	

Información General	
Tipo de documento	Trabajo de Grado
Acceso al documento	Universidad Pedagógica Nacional. Biblioteca Central
Título del documento	Diseño de un módulo para la enseñanza de la cinemática y dinámica de las galaxias como introducción a la teoría de la materia oscura.
Autor(es)	Montaño Ballén, Carla Viviana
Director	Monroy Cañón, Ignacio Alberto - Delgado Correal, Camilo
Publicación	Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional, 2016, 88 p.
Unidad Patrocinante	Universidad Pedagógica Nacional
Palabras Claves	GALAXIAS, MATERIA OSCURA, BRILLO SUPERFICIAL, CORRIMIENTO DOPPLER, CURVA DE ROTACIÓN, DISCREPANCIA DE LAS MASAS, LUMINOSIDAD, ROTACIÓN GALÁCTICA.


1. Descripción
<p>El presente documento muestra el proceso mediante el cual se elaboró una herramienta pedagógica que permita una mejor comprensión del estudio de las galaxias, su sistema de clasificación dependiendo su forma, su cinemática y dinámica rotacional para luego introducir la teoría moderna de la materia oscura.</p> <p>Para esto se introduce un marco teórico dentro de cada una de las teorías que han sido relevantes para la construcción de estos conceptos, como es el caso de la astronomía en la antigüedad, la Ley de gravitación universal de Newton y los métodos de medición de masa de las galaxias regulares.</p> <p>Posteriormente se muestra la herramienta pedagógica que permitirá de una forma didáctica ayudar a la comprensión de cada uno de los conceptos en cuestión, por medio de una serie de actividades secuenciales, que permitan ir conociendo las galaxias y como objetivo fundamental introducir el concepto de materia oscura.</p>

2. Fuentes
<ul style="list-style-type: none"> • Otálora, C. (2003) MOND como posible solución a la discrepancia de masas en galaxias espirales. Tesis Universidad Pedagógica Nacional. • Duarte, M. (2003). Materia Oscura en las Galaxias Regulares. Tesis Universidad Pedagógica Nacional.

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <small>Escuela de Pedagogía</small>	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 2 de 4	

- Innovación Educativa de servicio (2008). Aprendizaje basado en Problemas. Guías rápidas sobre nuevas metodologías.
- Giubergia, H. Incorporación de las TICS en la enseñanza de la Física: Laboratorios virtuales basados en simulación. Revista Iberoamericana de educación en tecnología, Vol (8), pp 16-22.
- Bosma, A. (1998) A 21-cm line study of ngc 5963, an sc galaxy with a low-surface brightness disk. Astronomy and Astrophysics. Vol (198), pp 100 – 108
- Kurtz, S. (2013). Medición de la curva de Rotación Galáctica a través de la línea de emisión de 21cm del Hidrógeno Neutro. Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Universidad Autónoma de Coahuila, Centro de Radioastronomía y Astrofísica UNAM, Campus Morelia.
- Rubin, Vera C y Ford Jr, W Kent y Thonnard, Norbert (1980). propiedades de rotación de las galaxias 21 SC con una amplia gama de luminosidades y radios, desde NGC 4605 / R = 4kpc / a UGC 2885 / R = 122 kpc. La revista Astrophysical Journal. Vol (238), pp (471 - 487)
- Forbes, DA and Depoy, DL (1992). Near-infrared surface photometry of NGC 253. Astronomy and Astrophysics. Vol (259), pp (97 - 100)
- Karttunen, Hannu y Cróger, Pekka Oja y, Heikki y Poutanen, Markku y Donner, Karl Johan (2007). Fundamental Astronomy, Fifth Edition. Springer Science \ & Business Media

3.Contenidos
<p>CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN Y PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN</p> <p>En éste capítulo se muestra la presentación del problema por el cual se realizó la investigación, sus objetivos y metodología.</p>
<p>CAPÍTULO II LAS GALAXIAS REGULARES.</p> <p>El objetivo del capítulo es mostrar el proceso histórico del estudio de uno de los componentes del universo, como son las galaxias, los criterios de clasificación y la descripción cualitativa de sistemas ligados gravitacionalmente.</p>
<p>CAPÍTULO III MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA MASA DE LAS GALAXIAS</p>

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <small>Escuela de Pedagogía</small>	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 3 de 4	

REGULARES

En éste capítulo se muestra el proceso histórico que se realizó para la medición de la masa de las galaxias, inicialmente desde el estudio del espectro en el límite óptico, en donde se podía estudiar la luminosidad que emite la galaxia por unidad de área. Después se presenta el modelo rotacional galáctico, el cuál fue usado para medir la curva de rotación de la galaxia la Vía Láctea, esto por medio del estudio del espectro de la línea de emisión del Hidrógeno de 21cm, la cual es percibida en ondas de Radio.

CAPÍTULO IV ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN.

El objetivo del capítulo es mostrar los resultados que se obtuvieron con la implementación de la herramienta pedagógica creada, para concluir si se cumplió el objetivo principal.

CAPÍTULO V CONCLUSIONES

En este capítulo se muestra las conclusiones de los alcances obtenidos en el desarrollo del trabajo de grado.

ANEXO: GUIA DE APRENDIZAJE SOBRE LA DINÁMICA DE LAS GALAXIAS

En esta sección se presenta la herramienta pedagógica que se creó, con la finalidad de que la persona que quiera usarla como apoyo en las clases de astronomía, tenga el acceso al módulo y las actividades planteadas


4. Metodología

El modelo pedagógico propuesto para el desarrollo de este proyecto es por medio del Aprendizaje Basado en Problemas **ABP**, este modelo didáctico permite que los estudiantes se involucren de forma activa en el desarrollo de su propio aprendizaje, ya que como punto de partida para la para la adquisición e integración de los nuevos conocimientos, el docente presenta un problema y los estudiantes mediante la investigación y reflexión deben llegar a una solución ante un problema planteado por el profesor.

El objetivo principal es que la adquisición del conocimiento pueda ser susceptible de ser utilizado y desarrollo desde un aprendizaje autónomo y fortaleciendo las habilidades del estudiante para la resolución del problema.

5. Conclusiones

- Durante el desarrollo del presente trabajo, se realizó la descripción morfológica de las galaxias, mostrando los criterios de clasificación usados por Hubble, para esto

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <small>Escuela de Pedagogía</small>	FORMATO		
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE		
Código: FOR020GIB	Versión: 01		
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 4 de 4		

se usó la página web del SLOAN como herramienta de apoyo visual, en donde los estudiantes pudieron observar mejor las galaxias, al acercarlas, ver sus colores y formas.

- Se contextualizó la problemática de la curva de rotación de velocidades de las galaxias regulares por medio del modelo gravitacional Newtoniano y los trabajos de Tully -Fischer y Faber-Jackson, esta descripción de la curva de rotación se encuentra en la región del óptico visible, lo que permitía hablar de los primeros estudios realizados para calcular la masa de las galaxias.
- A partir del trabajo de radioastronomía y astrofísica de la UNAM, se obtuvo la curva de rotación de la Vía Láctea, basado en el espectro de la línea 21cm del Hidrógeno Neutro, se extrajo la velocidad máxima, con la cual se obtuvo la curva de velocidades, este trabajo fue una parte fundamental para el entendimiento de la dinámica en las galaxias y por consiguiente, introducir la teoría de la materia oscura como solución a la discrepancia de los datos teóricos y observacionales en el cálculo de la masa de las galaxias, ya que esta curva de rotación evidencia, que las velocidades no decrecen a medida que aumenta el radio sino permanecen constantes.
- Con la primera implementación del módulo, se puede concluir que el módulo se puede desarrollar hasta la actividad 3, con estudiantes de diferente formación disciplinar, ya que se evidencio gran interés en los estudiantes por conocer cómo se clasifican las galaxias por su color, forma, brillo.
- Teniendo en cuenta la evaluación hecha por los estudiantes de la clase de astronomía general, es de vital importancia contar con el computador para el acceso a la plataforma del SLOAN, y la elaboración de las gráficas planteadas, ya que de esta manera se comprende mejor la temática.
- Es importante aclarar que en el momento que se quiera implementar el módulo, debe ser a una población que tenga conceptos previos asociados a la astronomía, ya que los estudiantes de la segunda implementación pertenecen al semillero de astronomía, por lo tanto se evidencio una mejor comprensión del tema.

Elaborado por:	Carla Viviana Montaña Ballén
Revisado por:	Ignacio Alberto Monroy Cañón, Camilo Delgado Correal

Fecha de elaboración del Resumen:	11	06	2016
--	----	----	------

Índice general

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Problema de Investigación	1
1.2. Objetivo General	3
1.3. Objetivos Específicos	3
1.4. Antecedentes de la Investigación	3
2. LAS GALAXIAS REGULARES	5
2.1. Clasificación de las galaxias según su morfología	5
2.1.1. Galaxias Elípticas	7
2.1.2. Galaxias Espirales	8
2.1.3. Galaxias Lenticulares	12
2.1.4. Galaxias Irregulares	13
2.2. Descripción cualitativa de sistemas ligados gravitacionalmente	14
3. MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA MASA DE LAS GALAXIAS REGULARES	19
3.1. Cálculo de la masa a través de la luminosidad	20
3.1.1. Perfil de brillo galáctico	20
3.1.2. Perfil de brillo superficial de las galaxias espirales	21
3.1.3. Perfil de brillo superficial de galaxias elípticas	23
3.1.4. Relación entre brillo superficial y luminosidad	24
3.1.5. Razón Masa/Luminosidad	25
3.1.6. Relación de Tully-Fisher	27
3.1.7. Relación de Faber-Jackson	29
3.1.8. Cálculo de la masa dinámica de las galaxias	31

3.1.9.	Cálculo de la curva de rotación a través de la línea de 21 cm del HI	33
3.1.10.	Curva de Rotación de la Vía Láctea	39
3.2.	La Materia Oscura como solución a la discrepancia de las masas	46
3.2.1.	Naturaleza de la Materia Oscura	48
4.	ANÁLISIS Y RESULTADOS	51
5.	ANEXOS	61
5.1.	PRESENTACIÓN	62
5.2.	PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA ENSEÑANZA:	64
5.3.	¿ Qué es una Galaxia?	64
5.3.1.	Quién las observo por primera vez?	65
5.3.2.	¿ Cómo las clasificaron?	66
5.3.3.	Galaxias Elípticas	68
5.3.4.	Galaxias Espirales	68
5.4.	USO DE LAS TICS	70
5.5.	SLOAN DIGITAL SKY SURVEY	72
5.6.	ACTIVIDAD 1	73
5.7.	ACTIVIDAD 2	74
5.7.1.	Diagrama del Tenedor de Hubble	74
5.8.	ACTIVIDAD 3	75
5.8.1.	ESPECTROSCOPIA ESTELAR:	76
5.8.2.	El Espectro	77
5.8.3.	CORRIMIENTO AL ROJO (REDSHIFT)	77
5.9.	ACTIVIDAD 4	79
5.9.1.	Cálculo de la masa a través de la Luminosidad	81
5.10.	ACTIVIDAD 5	82
5.10.1.	Curva de Rotación	84
5.11.	ACTIVIDAD 6	84
5.11.1.	Curva de rotación de la Vía Láctea	85
5.12.	ACTIVIDAD 7	87
5.13.	ACTIVIDAD 8	90
5.14.	ACTIVIDAD 9	91
6.	ANÁLISIS Y RESULTADOS	92

Índice de figuras

2.1. Tipos Wolf	6
2.2. Secuencia Hubble	7
2.3. Clases elípticas.	8
2.4. Vía láctea.	9
2.5. Diagrama Vaucouleurs.	10
2.6. Diagrama Vaucouleurs.	11
2.7. Diagrama Vaucouleurs.	12
2.8. Galaxia Lenticular	12
2.9. Colisiones entre galaxias	13
2.10. Galaxia Irregular <i>M82</i>	14
2.11. Potencial	18
3.1. Intensidad	20
3.2. Perfil Brillo <i>NGC7331</i>	21
3.3. Perfil de Brillo galaxias Espirales	22
3.4. Perfil de Brillo galaxia	23
3.5. Distancia	24
3.6. razón M/L	26
3.7. Distancia-Velocidad	27
3.8. Dispersión de velocidades en elípticas	30
3.9. Curvas de Rotación <i>M101</i>	32
3.10. Curvas de Rotación <i>M101</i>	32
3.11. Espectro	34
3.12. Línea del Hidrógeno	35
3.13. Plano Galáctico	37

3.14. Espectro Longitud Galáctica	40
3.15. Espectro Longitud Galáctica	40
3.16. Espectro Longitud Galáctica	41
3.17. Tabla de datos	42
3.18. Curva de Rotación	43
3.19. Curva de Rotación	45
3.20. Curva de Rotación	47
3.21. Curva de Rotación	48
3.22. WIMPs	50
4.1. Actividad 1. Estudiante Tatiana López	52
4.2. Actividad 1. Estudiante Carlos Germán Cortés	52
4.3. Actividad 2. Estudiante Carlos Germán Cortés	54
4.4. Actividad 2. Estudiante Laura Quiroga	54
4.5. Detalle del espectro óptico, por medio de la herramienta <i>DR12</i> del SLOAN,[16]	55
4.6. Actividad 3. Estudiante Karen Rojas	56
4.7. Actividad 3. Estudiante Laura Quiroga	56
4.8. Actividad 3. Estudiante Laura Quiroga	57
4.9. Actividad 7. Estudiante Edwin Delgado Quintero	58
4.10. Actividad 7. Estudiante Dylan Steven Llanos	58
4.11. Actividad 7. Estudiante Nicolás Molina	59
5.1. portada	61
5.2. modulo	63
5.3. Galaxia Espiral	65
5.4. Charles Messier	66
5.5. Clasificación Wolf	67
5.6. Secuencia Hubble	67
5.7. Clases elípticas.	68
5.8. Vía láctea.	69
5.9. TIC	71
5.10. SLOAN	72
5.11. SLOAN	73
5.12. tenedor	74

5.13. Sintonía Hubble	75
5.14. Tabla de Clasificación de Galaxias	75
5.15. Visualizar	76
5.16. Corrimiento Doppler . Tomado de <i>www.taringa.net/posts/ciencia – educacion</i> .	78
5.17. Valores de z	79
5.18. Espectros encontrados en el SSDS [16]	80
5.19. Tabla de Ubicación del Redshift	81
5.20. Fotometría	82
5.21. Gráficas de Galaxias Espirales	83
5.22. Gráficas de Galaxias Elípticas	83
5.23. Tabla datos para hallar la curva Brandt.	85
5.24. Plano Galáctico	86
5.25. Espectro Longitud Galáctica	87
5.26. Espectro Longitud Galáctica	88
5.27. Espectro Longitud Galáctica	88
5.28. Datos Calculados	89
5.29. Cuadro comparativo	90
5.30. Formato Evaluación	91
6.1. Actividad 1. Estudiante Tatiana López	93
6.2. Actividad 1. Estudiante Carlos Germán Cortés	93
6.3. Actividad 2. Estudiante Carlos Germán Cortés	95
6.4. Actividad 2. Estudiante Laura Quiroga	95
6.5. Detalle del espectro óptico, por medio de la herramienta <i>DR12</i> del SLOAN,[16]	96
6.6. Actividad 3. Estudiante Karen Rojas	97
6.7. Actividad 3. Estudiante Laura Quiroga	97
6.8. Actividad 3. Estudiante Laura Quiroga	98
6.9. Actividad 7. Estudiante Edwin Delgado Quintero	99
6.10. Actividad 7. Estudiante Dylan Steven Llanos	99
6.11. Actividad 7. Estudiante Nicolás Molina	100

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Problema de Investigación

La Astronomía es un área disciplinar de la ciencia que estudia los cuerpos celestes que están en el universo como estrellas, agujeros negros, planetas, cometas, satélites, materia interestelar que forman galaxias, las cuales al agruparse forman cúmulos de galaxias[8]. Actualmente la astronomía es un campo activo de investigación en las ciencias, ya que contiene trabajos transversales con otras ramas como la física, química y otras.

En el ámbito de la educación la astronomía juega un papel importante en la enseñanza ya que la mayoría de estudiantes presentan gran interés por ésta, este interés se puede evidenciar en todos los niveles de educación a nivel nacional e internacional [28], ya que algunas instituciones y universidades ofrecen cursos de astronomía electivos los cuales son vistos por los estudiantes que muestran interés por el aprendizaje sin importar el tiempo adicional que se requiera para llevar a cabo estos cursos.

Gran parte de los aportes que se hacen para la enseñanza y el aprendizaje de la Astronomía es por medio de la literatura al contar con libros, conferencias, sitios en Internet y trabajos de investigación, los cuales son una parte fundamental en el estudio de la física y la Astronomía. Se debe reconocer la importancia de la enseñanza de la astronomía empleando metodologías interactivas como simulaciones, animaciones y actividades en sitios web que ofrecen agencias de investigaciones como la NASA [14], SDSS [16], la ESA, ESO, etc.

En el ámbito disciplinar uno de los sistemas astronómicos que se ha estudiado más recientemente son las galaxias, por ejemplo nuestra galaxia la Vía Láctea esta conformada por aproximadamente 100 mil millones de estrellas [14], polvo estelar, cúmulos globulares, los cuales se mantienen unidos por su acción gravitatoria. Por medio de estudios físicos que han sido desarrollados en los últimos 80 años se han caracterizado las observables que describen las galaxias los cuales son: masa, velocidad de rotación galáctica y el radio [5].

Podemos calcular la cantidad de masa que poseen las galaxias usando métodos observacionales basados en las propiedades de la materia medida desde la Tierra. Uno de estos métodos es, la velocidad de rotación de los cuerpos que componen las galaxias. Al comparar los datos obtenidos con los métodos observacionales, se genera una discrepancia con los datos teóricos, a esta discrepancia se le da el nombre de *Materia Oscura*, esta materia no emite alguna radiación que sea percibida en ninguna longitud de onda, pero si afecta el movimiento de los cuerpos que componen las galaxias. Los primeros datos observacionales de anomalías en la velocidad de rotación de las galaxias fueron hechos por *Fritz Zwicky* en el Cúmulo de Coma *Abell1656* en el año 1933 [13]. De lo anterior se propone el siguiente problema de investigación:

¿Mediante qué tipo de estrategia pedagógica podemos introducir la temática moderna de materia oscura?

Este interrogante conlleva a la elaboración de este trabajo de grado, que se enmarca en el diseño de una propuesta para la enseñanza de esta temática a partir de un módulo que contiene un conjunto de actividades, enlazadas con el uso de las TIC [7], como la página web del SLOAN, el cual pretende conservar el carácter didáctico y disciplinar permitiendo una mejor comprensión del fenómeno [16], buscando un aprendizaje significativo en las personas que lo usen como herramienta para fortalecer sus conocimientos en astronomía, estas actividades están orientadas a la enseñanza de las galaxias y el mecanismo de medición de las velocidades de rotación de una galaxia y su confrontación con los datos de los modelos Newtonianos.

OBJETIVOS

1.2. Objetivo General

Diseñar un módulo como estrategia pedagógica para la introducción del concepto estándar de la materia oscura en las galaxias, a través del estudio de la cinemática rotacional de las mismas.

1.3. Objetivos Específicos

- Describir las principales propiedades morfológicas y estructurales de las galaxias.
- Describir la dinámica rotacional Newtoniana de las galaxias.
- Mostrar el método de medición de masa de las galaxias por medio de la Luminosidad.
- Hallar la curva de rotación de la Vía Láctea por medio de los datos observacionales de la *Línea de Emisión de 21 cm*.
- Entender la conexión del concepto materia oscura y la velocidad de rotación de la Vía Láctea.
- Realizar las actividades del módulo que permitan reconstruir la curva de rotación de las galaxias, a partir de una base de datos observacionales de diferentes galaxias.
- Implementar el modulo en un espacio académico de Astronomía a nivel universitario.

1.4. Antecedentes de la Investigación

Con la finalidad de contextualizar este trabajo se realizó una búsqueda de trabajos y artículos a nivel nacional e internacional, que presentan gran importancia para la elaboración del trabajo de grado.

A nivel nacional en el proceso de búsqueda y recopilación de información se encontraron varios documentos, el primero de ellos es una tesis de la Universidad Pedagógica Nacional llamada *Materia Oscura en galaxias regulares*, esta tesis esta orientada desde un carácter teórico, la cual plantea recoger las principales características de las galaxias regulares, realizando un desarrollo

detallado del mismo, y la presentación de la materia oscura, como solución a la discrepancia de las masas [12].

A su vez la tesis titulada *MOND como posible solución a la Discrepancia de Masas en Galaxias Espirales*, de la Universidad Pedagógica Nacional, esta orientada desde un carácter teórico, esta presenta la dinámica de Newton modificada para predecir las curvas de rotación de las galaxias y así postular la materia oscura como solución a la discrepancia de las masas en las galaxias [27].

A nivel internacional en el proceso de búsqueda y recopilación de información, se encuentra la página interactiva del SLOAN, creada en el año 2000, como un proyecto de investigación del espacio mediante una serie de imágenes, tomadas con el telescopio del observatorio Apache Point de Nuevo México [16], esta página es una herramienta fundamental para el desarrollo de algunas de las actividades planteadas en el módulo.

Además de esta página esta el trabajo realizado por el profesor *Stan Kurtz*, el propósito de este trabajo es obtener la gráfica de velocidad máxima de rotación del gas, a diferentes longitudes a lo largo del plano Galáctico, en función de la distancia al centro Galáctico, a partir de observaciones de la línea espectral de 21cm del hidrógeno neutro [25].

Uno de los artículos de gran relevancia para la elaboración de las gráficas de la curva de rotación de las galaxias, es llamado *Rotational properties of 21 SC galaxies with a large range of luminosities and radii*, este artículo muestra una serie de datos los cuales fueron usados para reconstruir las curvas de rotación de varias galaxias espirales, estas gráficas evidencian la existencia de la materia oscura [15].

Capítulo 2

LAS GALAXIAS REGULARES

Hacia el siglo XVIII Charles Messier con tan solo 14 años empezó a mostrar un gran interés por la Astronomía, cuando solía mirar encantado las estrellas, en una de sus observaciones en el año 1744, el gran cometa de seis colas, catalogado por Dirk Klinkenberg con el curioso nombre: *C/1743X1* - cruzó el firmamento, el interés de Charles por la Astronomía se despertó, desde ese momento comenzó sus aventuras cazando cometas. En su búsqueda observó que habían figuras borrosas que no eran cometas; estas *Nebulosidades* fueron escritas en su primer Catálogo de Nebulosas de la historia, publicado en 1784 y contenía 103 objetos, 39 de los cuales corresponden a Galaxias.

Después algunos astrónomos como William Herschel, Christian Doppler y William Parsons continuaron con este estudio y en el año 1926 Edwin Hubble presenta su esquema de clasificación de Galaxias según su morfología.

A continuación se presentará la clasificación de Galaxias realizada por Edwin Hubble basados en las referencias, y después se realizara una aproximación al estudio de sistemas ligados gravitacionalmente.

2.1. Clasificación de las galaxias según su morfología

Las galaxias son sistemas formados por varios componentes como estrellas, gas que principalmente es de Hidrógeno neutro (HI)¹, gas ionizado (HII), nubes moleculares, los cuales están ligados gravitacionalmente [5].

¹también se encuentran estos elementos pero en menor cantidad: CO, CN, OII, NII, HeI, NeIII, CaII y Fe, entre otros

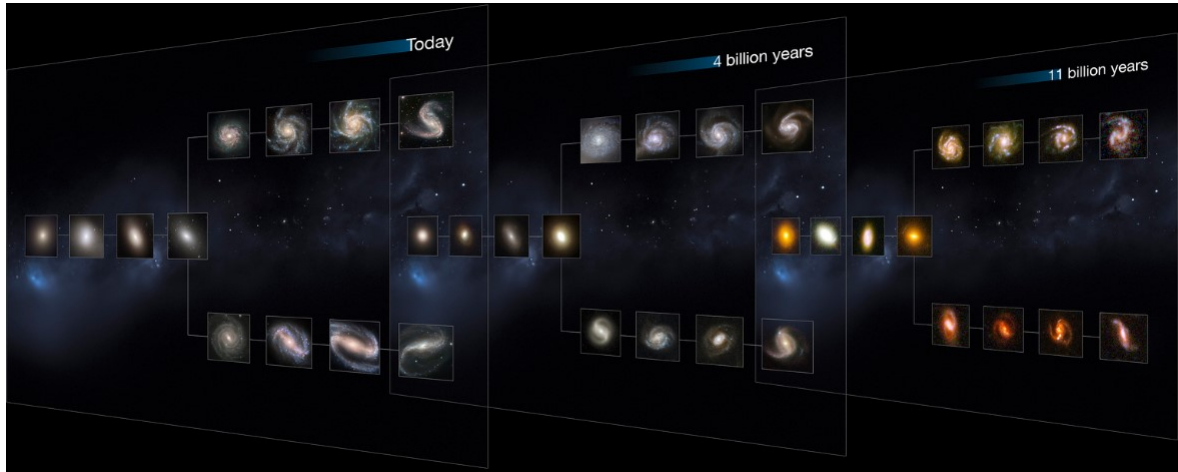


Figura 2.2: Secuencia Hubble, publicado en 1936. Tomada de www.flickr.com/photos/gsfrc/9524854754, muestra como han evolucionado las galaxias desde hace 11 Billones de años

2.1.1. Galaxias Elípticas

Las galaxias elípticas tienen una estructura más definida en la secuencia Hubble, se ubican a la izquierda del sistema de clasificación como muestra la Figura 2.2; son casi todas de color rojo ya que la mayor parte de estrellas que tiene son estrellas de población II², estas estrellas se encuentran distribuidas en toda la galaxia.

Las galaxias elípticas contienen poco gas, por lo tanto su producción de estrellas es muy baja, son las galaxias más grandes del universo, éstas pueden contener un billón de estrellas y algunas de ellas parecen contener un agujero negro supermasivo en su centro [16].

Estas galaxias tienen forma de elipsoide, la relación 2.1 se usa para clasificarlas dependiendo su forma elíptica, con el tipo Eq , donde E es abreviatura de *elíptica* y q es igual a:

$$q = 10\left(1 - \frac{a}{b}\right), \quad (2.1)$$

siendo a el diámetro del eje mayor y b el diámetro del eje menor de la proyección del elipsoide en el plano del cielo. Así, una galaxia ($a = b$) es una galaxia de forma circular, se clasifican desde $E0$ hasta $E7$, siendo $E7$ la que tiene forma más elíptica.

²Las estrellas de población II, son estrellas viejas y con pocos metales que se encuentran principalmente en cúmulos globulares [8]

En la Figura 2.3, se observan tres galaxias elípticas, las cuales están clasificadas dependiendo de tan elipsoidales son: siendo la galaxia *NGC5812* es una *E0*, la galaxia *NGC1700* es una *E3* y la galaxia *NGC4623* es una *E7* [1]. Inicialmente se pensaba que eran elipsoides de revolución, siendo el eje de simetría el de rotación, luego se vio que su giro era demasiado lento y era incapaz de producir la *excentricidad de la elipse* en su proyección [8].

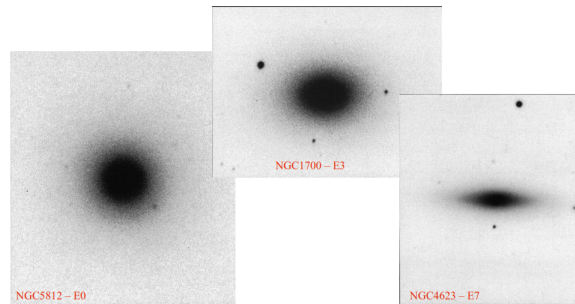


Figura 2.3: Galaxias Elípticas, clasificadas dependiendo de tan elipsoidales son *NGC5812* – *E0*, *NGC1700* – *E3*, *NGC4623* – *E7*. Tomado del texto [1]

2.1.2. Galaxias Espirales

Galaxias Espirales Normales y Barradas

Las galaxias espirales en la secuencia Hubble 2.2, son denotadas con la letra *S*, tienen tres componentes como se ilustra en la Figura 2.4 que las caracteriza, los cuales son:

1. El Bulbo Galáctico: es una región de forma elipsoidal que constituye la zona alrededor del centro de la galaxia. En esta parte de la galaxia se encuentran estrellas de población II.

2. Su Disco Galáctico: es una estructura aplanada y más extensa, compuesta por estrellas de población I³. Tienen una distribución en forma de brazos espirales, estos brazos espirales se comportan como ondas de densidad que explican el enrollamiento de los brazos, en donde hay mayor densidad más fácilmente nacen estrellas y en los bordes de los brazos hay mayor cantidad de polvo y HI. No todas las galaxias espirales tienen brazos definidos, algunas llamadas

³Las estrellas de población I, son estrellas jóvenes ricas en metales, se encuentran los cúmulos globulares abiertos que están formados por estrellas gigantes, como el Sol que pertenece a este tipo de estrellas

floculentas, su aspecto recuerda más una **cabellera** espiral que unos brazos [8].

3. Halo Galáctico: es una región de forma esférica que rodea a las otras dos componentes, contienen estrellas de población II, cúmulos globulares⁴.

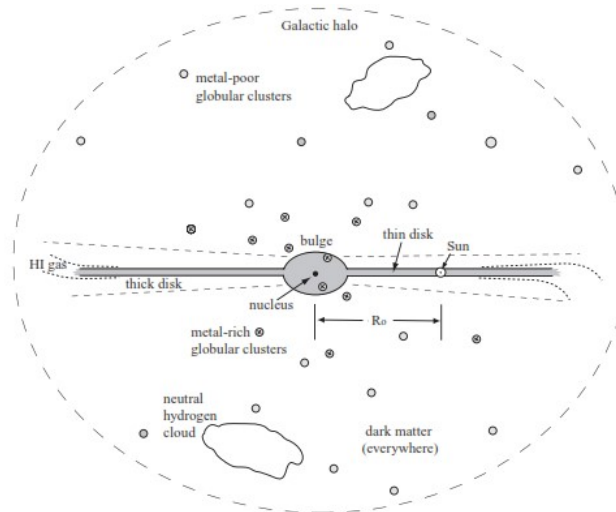


Figura 2.4: Componentes principales de las galaxias espirales (Vía Láctea). Tomado del texto [6]

Clasificación de las Galaxias Espirales

Las galaxias espirales se dividen en dos grandes grupos: *espirales normales (S)* y las *espirales barradas (SB)*, esta última tiene una barra, que sale desde el bulbo en dirección opuesta, de la cual emergen de sus extremos estructuras más brillantes en forma de espirales los cuales son llamados *brazos espirales*. Normalmente, los brazos espirales emergen desde el final de la barra. En el sistema de clasificación Hubble, Figura 2.2, se subdividen en las siguientes categorías dependiendo de varias características, algunas como la separación de los brazos *a, ab, b, bc* y *c*, siendo *Sa* las que tienen los brazos poco abiertos. Otras de las propiedades que caracterizan una galaxia espiral, son:

- El tamaño de bulbo, este contiene estrellas de población II.

⁴Los cúmulos globulares son agrupaciones de estrellas, que tienen una simetría esférica, se mueven en órbitas elípticas alrededor del bulbo galáctico y tiene muy poco gas

- El disco con forma aplanado y con abundante gas, donde se presenta el nacimiento de estrellas jóvenes y regiones HII⁵ en el disco [12].

Las llamadas *espirales tempranas Sa*, tienen el bulbo mayor, en comparación con el disco, y las *espirales tardías Sc*, tienen un bulbo menor pero poseen más cantidad de gas. Las galaxias que tienen la presencia de una barra, se clasifican como *SB*. Estas también se sub-clasifican por la separación de los brazos y la presencia de gas en sus brazos [8].

La *Secuencia Hubble* fue modificada y expandida por otros astrónomos, como Allan Sandage, Gerard de Vaucouleurs y Sidney Van de Bergh en el año 1959. Gerard de Vaucouleurs introduce un código numérico (*T-tipo*) para cada tipo de galaxia.⁶ Este esquema de clasificación se representa en la siguiente Figura:

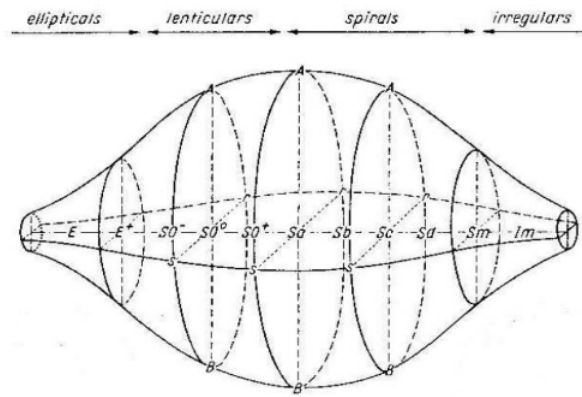


Figura 2.5: Diagrama tri- dimensional de clasificación de Vaucouleurs. Tomado del texto [20]

Este esquema de clasificación de *De Vaucouleurs* tiene tres ejes para clasificar las galaxias: en el eje principal se encuentra la secuencia:

$$E - E^+ - SO^0 - Sa - Sb - Sc - Sd - Sm - lm$$

donde *m* significa magallánica refiriéndose a las Nubes de Magallanes, el $-$ significa temprano (suave) y el $+$ significa tardío (irregular).

⁵HII es la notación para el Hidrógeno Ionizado, estas regiones son detectadas por su abundante emisión en $H\alpha$ y están asociadas a zonas de formación estelar

⁶El esquema de Vaucouleurs está en el catalogo RC3 (Sus siglas en inglés *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies de Vaucouleurs* 1991 [8])

Un segundo eje indica si la galaxia tiene barra se define como SB , si no tiene barra SA o si tiene barra pero es muy débil SAB .

Por último el tercer eje describe objetos que muestran anillos r , si son puramente espirales s o con características intermedias rs .

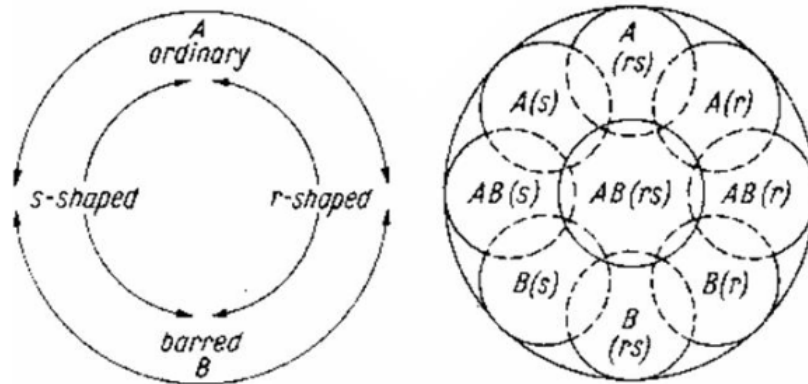


Figura 2.6: Diagrama de los componentes barra y anillo del sistema de clasificación de De Vaucouleurs. Tomado del texto [20]

Estos ejes se evidencian en la Figura 2.6, el eje principal de este sistema es representado por un parámetro T , el cual es definido en la Figura 2.7 que muestra la relación entre el sistema de clasificación de Hubble y el valor del parámetro T . Los valores de T están correlacionados con los colores que se observan en las galaxias, según este diagrama son tres grupos de colores principales:

1. **La secuencia de color rojo**, incluye la mayoría de las galaxias rojas que generalmente son galaxias elípticas.
2. **La nube azul**, incluye la mayoría de las galaxias azules que generalmente son espirales .
3. **El verde valle**, en este se combinan las dos distribuciones de un espacio poco poblado que incluye una serie de espirales rojas.

Hubble	E	E/S0	S0	S0/a	Sa	Sa-b	Sb	Sb-c	Sc	Sc-Irr	Irr
T	-5	-3	-2	0	1	2	3	4	6	8	10

Figura 2.7: Tabla que relaciona el sistema de clasificación de Hubble con el sistema de clasificación de De Vaucouleurs. Tomado del texto [20]

2.1.3. Galaxias Lenticulares

Las galaxias lenticulares, son denotadas por SO , fueron propuestas y caracterizadas por Hubble, sin evidencia experimental, como aquellas que comparten características de las galaxias espirales y de las galaxias elípticas, como la estructura uniforme y la poca cantidad de gas que poseen las elípticas, pero con un núcleo definido y una distribución de luminosidad general, similar a las espirales. Las principales características de estas galaxias son:

El Bulbo, de apariencia elíptica con una condensación central brillante y suave, rodeado de una componente sin estructura y cuyo brillo decrece suavemente hacia el bulbo.

El Disco, su estructura es aplanada y con presencia de polvo en sus bordes [8].



Figura 2.8: Galaxia Lenticular $NGC5866$. Tomada de la página: NASA, ESA, Hubble Legacy Archive; Processed y Copyright: Hunter Wilson

La Figura 2.8, muestra la galaxia lenticular $NGC5866$ esta galaxia tiene numerosos caminos de polvo de color oscuro y rojo, mientras que muchas de las estrellas brillantes en el disco le dan un matiz más azul, en esta parte del disco hay presencia de estrellas de población I, las cuales se extiende más allá del polvo en el plano galáctico, mientras que la protuberancia en el centro refleja un color naranja - rojizo evidenciando la presencia de estrellas de población II [14].

2.1.4. Galaxias Irregulares

Las galaxias *Irregulares* son aquellas que no encajan en las clases ya sea de las espirales o elípticas, por su forma se asume que son el resultado de colisiones o interacciones entre galaxias, como se observa en la siguiente Figura 2.9:

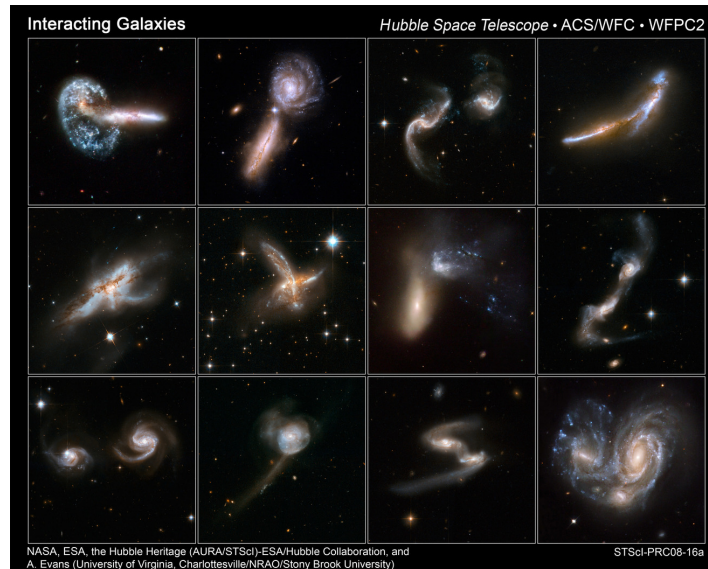


Figura 2.9: Colisiones entre galaxias. Tomada de la página: NASA, ESA, The Hubble Heritage Team, Gallagher (U. Wisconsin)

Estas interacciones entre galaxias se presentan por la agrupación de galaxias, la cual forma grupos o cúmulos de galaxias, estos cúmulos contienen tantas galaxias que son relativamente próximos entre sí y debido a esta cercanía las galaxias algunas veces chocan entre sí, a pesar de que las colisiones entre galaxias son comunes, las estrellas que están en cada galaxia, son tan distantes que las colisiones entre estrellas son muy pocas. En la figura 2.9 se puede observar dos galaxias interactuando gravitacionalmente.

Esta interacción provoca que las nubes de gas que se encuentran dentro de cada galaxia puedan llegar a ser comprimidas y que colapsen bajo su propia gravedad, este proceso puede conducir a un estallido de formación de estrellas, dejando una nueva generación de estrellas, en una galaxia donde la formación normal de estrellas pudo haber cesado hace mucho tiempo.

Incluso si las galaxias en realidad no chocan, aún pueden afectarse mutuamente por la fuerza gravitacional que ejercen entre ellas, causando una deformación. Ambos accidentes e incidentes



Figura 2.10: Galaxia Irregular $M82$, también se ha llamado *The Exploding Galaxy*. Se cree que recientemente ha pasado cerca de la galaxia $M81$, la gravedad de $M81$ terminó deformando a la galaxia $M82$, esta deformación causó una explosión en donde empezaron a formarse nuevas estrellas. Hoy en día, $M81$ y $M82$ se pueden observar fácilmente a través de binoculares [16]. Tomada de la página: NASA, ESA, The Hubble Heritage Team, Gallagher (U. Wisconsin)

entre las galaxias se conocen como *interacciones* [16].

2.2. Descripción cualitativa de sistemas ligados gravitacionalmente

Una galaxia es un sistema compuesto por gas, polvo y estrellas. Estos elementos rotan alrededor del núcleo central con una rapidez que está en función de su distancia al centro de la galaxia. Este caso se puede describir como la interacción de un sistema de dos cuerpos, entre el núcleo y uno de sus elementos que interactúan gravitacionalmente generando una fuerza, la cual es proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia r .

El movimiento de cada uno de estos cuerpos se describe a través de tres coordenadas que pueden ser: el ángulo acimutal φ , el ángulo cenital θ que hace referencia a la colatitud y la distancia al centro de giro r , de manera que su vector velocidad está dado por:

$$\vec{v} = \dot{r}\hat{e}_r + r\dot{\theta}\hat{e}_\theta + r\dot{\phi}\sin\theta\hat{e}_\phi. \quad (2.2)$$

La fuerza de Gravitación \vec{F} que gobierna el sistema, es derivada de una función potencial con simetría esférica que permite definir un Potencial $V = V(r)$ que solo depende de la distancia del radio r , por lo tanto el sistema es conservativo. De este modo, el momento angular \vec{L} de cualquier elemento que se encuentre en la galaxia está definido por $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} = \vec{r} \times m\vec{v}$. Para una partícula que está sometida a una fuerza central, este vector es *constante* en el tiempo y se puede describir así:

$$\vec{F} = -\nabla U(r) = -\frac{dU}{dr}\hat{e}_r. \quad (2.3)$$

por lo tanto la derivada temporal de L es nula debido a que la fuerza central es radial.

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \frac{d\vec{r}}{dt} \times \vec{p} + \vec{r} \times \frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{v} \times m\vec{v} + \vec{r} \times \vec{F} = 0. \quad (2.4)$$

Entonces en un sistema en donde solo actúan fuerzas centrales *el momento angular* L se conserva y está sería una constante del movimiento.

Esta constante es vectorial e implica que el movimiento permanezca en un plano, cuya normal sea en todo momento paralela a \vec{L} , en otras palabras si \vec{L} se dirige a lo largo del eje polar \vec{p} , el ángulo cenital θ debe tener el valor constante $\frac{\pi}{2}$.

Por lo tanto la expresión de la velocidad 2.2 de dicho elemento se reduce a:

$$\vec{v} = \dot{r}\hat{e}_r + r\dot{\phi}\hat{e}_\phi. \quad (2.5)$$

el momento angular \vec{L} determinado por los vectores \vec{r} y \vec{v} iniciales, se representan de la siguiente manera (Un cambio en el plano del movimiento implicaría un cambio en la dirección de \vec{L}).

Para describir el movimiento realizado por los cuerpos que se encuentran en la galaxia, con una masa m las cuales se encuentre bajo la acción de una fuerza central 2.3, se usarán las coordenadas polares, así:

$$\vec{F} = m\vec{a}. \quad (2.6)$$

esta fuerza se ejerce en r como en φ , por lo tanto:

$$\Sigma F_r = ma_r, \quad (2.7)$$

$$\Sigma F_\varphi = ma_\varphi. \quad (2.8)$$

y sabiendo que:

$$a_r = \ddot{r} - r\dot{\varphi}^2, \quad (2.9)$$

$$a_\varphi = r\ddot{\varphi} + 2\dot{r}\dot{\varphi}. \quad (2.10)$$

reemplazo en F_r

$$F_r = F_{(r)}, \quad (2.11)$$

$$ma_r = F_{(r)}, \quad (2.12)$$

$$m(\ddot{r} - r\dot{\varphi}^2) = F_{(r)}. \quad (2.13)$$

$$(2.14)$$

reemplazo en F_φ

$$F_\varphi = 0, \quad (2.15)$$

$$ma_\varphi = 0, \quad (2.16)$$

$$m(r\ddot{\varphi} + 2\dot{r}\dot{\varphi}) = 0, \quad (2.17)$$

multiplicando 2.17 por r se transforma en:

$$\frac{d(mr^2\dot{\varphi})}{dt} = 0, \quad (2.18)$$

$$l = mr^2\dot{\varphi}. \quad (2.19)$$

despejando $\dot{\varphi}$

$$\dot{\varphi} = \frac{l}{mr^2}. \quad (2.20)$$

reemplazo 2.20 en 2.17

$$m(\ddot{r} - r\dot{\varphi}^2) = F_{(r)}, \quad (2.21)$$

$$m\left(\ddot{r} - r\left(\frac{l^2}{m^2r^4}\right)\right) = F_{(r)}, \quad (2.22)$$

$$m\ddot{r} - mr\frac{l^2}{m^2r^4} = F_{(r)}, \quad (2.23)$$

$$m\ddot{r} = F_{(r)} + \frac{l^2}{mr^3}. \quad (2.24)$$

como $F = m\ddot{r}$ es de origen Gravitatorio, el potencial producido por la fuerza será:

$$V_{(T)} = - \int F dr, \quad (2.25)$$

$$V_{(T)} = - \int F(r)dr + \int \frac{l^2}{mr^3}dr, \quad (2.26)$$

$$V_{(T)} = V(r) + \frac{l^2}{mr^3} \int dr(r^{-3}), \quad (2.27)$$

$$V_{(T)} = V(r) + \frac{1}{2} \left(\frac{|\vec{l}|^2}{mr^2} \right). \quad (2.28)$$

La forma del potencial, de la ecuación 2.28, de una partícula con una energía E_1 no está ligada al campo gravitacional galáctico [5], la menor distancia a la que se puede encontrar es r_1 y su órbita forma una Hipérbola, como se ilustra en la Figura 2.11; mientras que, todas aquellas partículas que están ligadas gravitacionalmente deben tener una energía que está entre E_3 y E_4 ya que se encuentran en el pozo de potencial generado por la fuerza gravitacional del sistema.

Los elementos de una galaxia describen órbitas que no son necesariamente cerradas, pero están limitadas al espacio entre las esferas formadas por r_2 y r_3 .

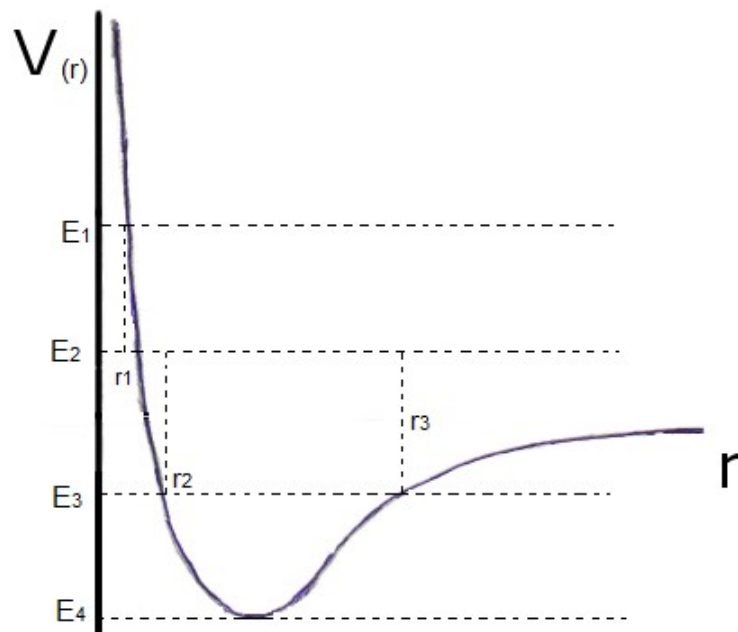


Figura 2.11: Energía de una partícula en un pozo de potencial. Tomado de [12]

Capítulo 3

MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA MASA DE LAS GALAXIAS REGULARES

Introducción

La distribución de masa en las galaxias es una importante cantidad tanto para la cosmología como para las teorías del origen y evolución de las galaxias. En los años 70 varios astrónomos empezaron a medir la cantidad de masa que podría tener una galaxia, estas mediciones se hicieron por medio de datos observacionales y usando la Teoría Kepleriana, las cuales se fundamentan independientemente en postulados que han demostrado ser validos a otras escalas.

Observacionalmente la masa se determina a partir de las velocidades de las estrellas y el gas interestelar. Al realizar el contraste de los datos obtenidos observacionalmente y los teóricos surge una diferencia en la cantidad de masa que puede tener una galaxia. Esta diferencia con lleva a encontrar una teoría que describa adecuadamente la dinámica de las galaxias.

En este capítulo se presentan los métodos utilizados para la medición de la masa de las galaxias espirales y elípticas, estos resultados observacionales se contrastarán, con los datos teóricos para evidenciar la discrepancia que se presenta en la medición de la masa de las galaxias, para así postular como posible solución de esta discrepancia la materia oscura.

3.1. Cálculo de la masa a través de la luminosidad

3.1.1. Perfil de brillo galáctico

Históricamente las galaxias se han estudiado por medio de la fotoastrometría, la cual va avanzando tecnológicamente para lograr obtener información del universo. La primera aproximación a la distribución de masa de una galaxia espiral se obtiene por medio de la distribución de brillo superficial.

Esta distribución del brillo superficial se detecta a través de dispositivos estándar para la astronomía, estas cámaras **CCD**, tienen una capa delgada de silicio que registra la potencia emitida por cada punto de la galaxia [6]. Luego se presenta en mapas de distribuciones de brillo, llamados *isofotas* como se ve en la siguiente Figura:

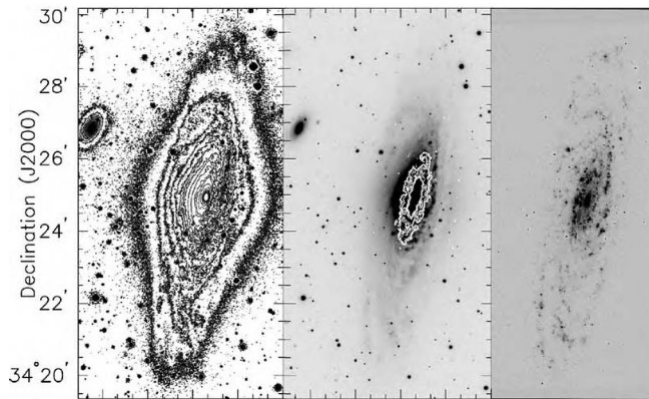


Figura 3.1: Galaxia espiral Sb *NGC7331*. Izquierda, isofotas en la banda *R*. En el centro, imagen negativa en la banda *R*, incluyendo una galaxia de fondo, con contornos de las emisiones de CO superpuesta. Derecha, imagen negativa en H_{α} , mostrando *H* las regiones II en los brazos espirales. A. Ferguson, M Thornley, y la encuesta BIMA de galaxias cercanas. Tomada de [6]

La Figura 3.1, muestra las isofotas, del brillo superficial en el área del núcleo y el disco con forma elíptica, en la imagen de la derecha es notoria la aparición de los brazos espirales de la galaxia *NGC7331* desde una imagen CCD en la banda *R*, alrededor de $6,400\text{\AA}$ [6].

La Figura 3.2 muestra el perfil de brillo de la galaxia *NGC7331*, la escala del eje vertical, corresponde a las medidas de brillo superficial, las cuales van descendiendo, ya que esta medida

de la magnitud del brillo, es menor cuanto más brillante es el cuerpo celeste.

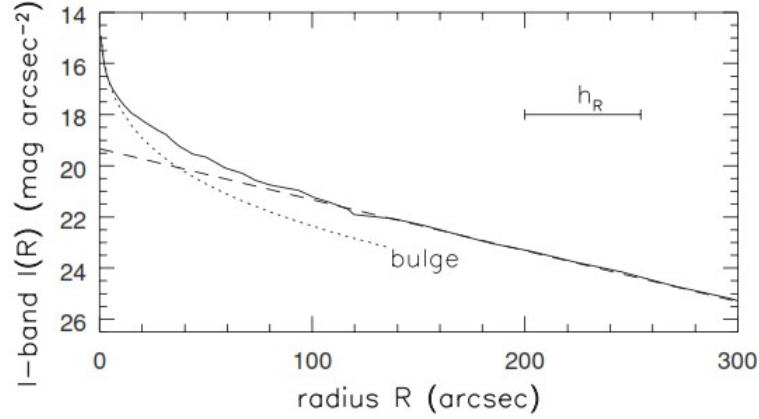


Figura 3.2: NGC7331, la línea continua muestra el brillo superficial en la banda del Infrarrojo, cerca de 8000\AA . Tomada de [6]

3.1.2. Perfil de brillo superficial de las galaxias espirales

La primera expresión utilizada para describir el perfil de brillo superficial de las galaxias espirales fue obtenida experimentalmente por Edwin Hubble en 1930 y es conocida como la *Ley de Hubble*.

$$\mu_r = \mu_0 \exp(-r/r_s) \quad (3.1)$$

donde μ_0 es el brillo superficial central, r_s representa el radio del disco que encierra el μ_0 , en galaxias cuyo brillo superficial central es $\mu_0 = 21,65 \text{ mag arcsec}^{-2}$, r es la escala radial del disco, este valor varia dependiendo el radio al cual se este midiendo las isofotas, a través de la expresión:

$$\frac{r_{25}}{r_s} = 3,0 \pm 0,4, \quad (3.2)$$

donde r_{25} es el radio en la isofota $\mu_r = 25 \text{ mag arcsec}^{-2}$. Las siguientes gráficas muestran la dependencia del brillo superficial con el radio, ya que el brillo decrece a medida que se aleja del centro galáctico

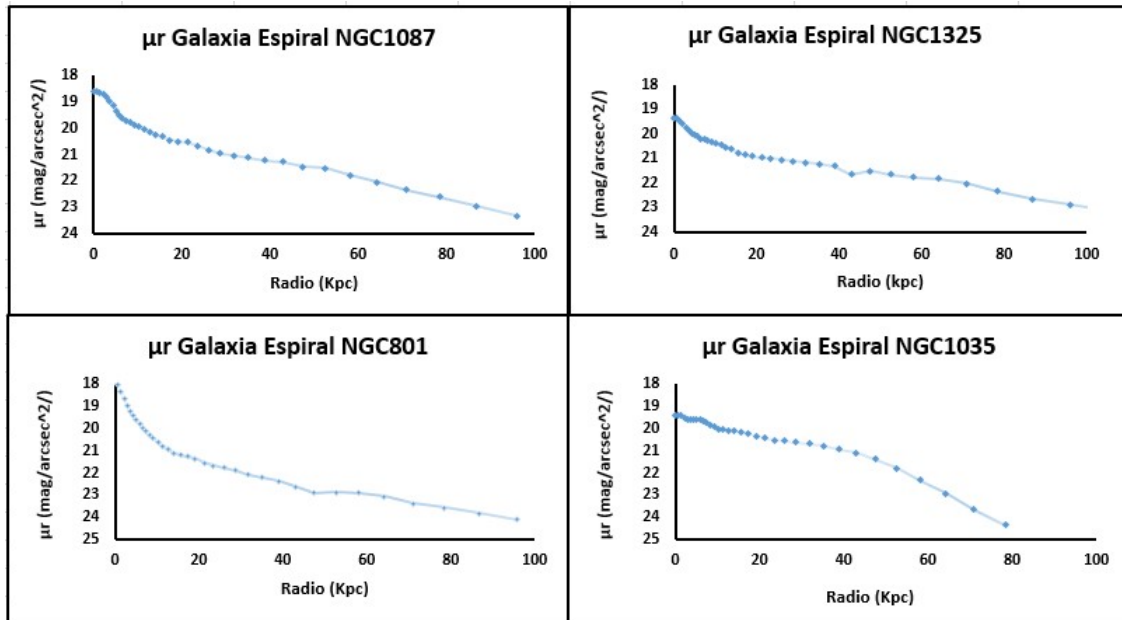


Figura 3.3: Perfil de Brillo Superficial de las Galaxias Espirales *NGC1035*, *NGC801*, *NGC1087*, *NGC1325*, el brillo se descompone en el bulbo y el disco, hasta los brazos. Datos Tomados de [11]

Kent (1986) describe los datos obtenidos con una cámara CCD de 37 galaxias; la Figura 3.3, presentan las curvas de brillo superficial de 4 galaxias espirales.

3.1.3. Perfil de brillo superficial de galaxias elípticas

Las galaxias elípticas tienen núcleos parecidos a los de las galaxias espirales, pero las galaxias elípticas, según la clasificación de Hubble no tienen brazos espirales, por lo tanto la medición del brillo superficial en las galaxias elípticas se realiza por medio de la expresión $r^{1/4}$ Ley de *Vaucouleurs* en 1948. Esta ley fue desarrollada experimentalmente por medio del estudio de 50 galaxias elípticas, que relaciona la disminución de la intensidad al alejarnos del centro galáctico[17]. Esta relación es dada por:

$$\mu_r = \mu_e \exp[-7,67((r/r_e)^{1/4} - 1)]. \quad (3.3)$$

siendo μ_e , la intensidad central y r_e el radio que encierra la mitad de la luminosidad proyectada por la galaxia. Estos parámetros varían de galaxia a galaxia [17].

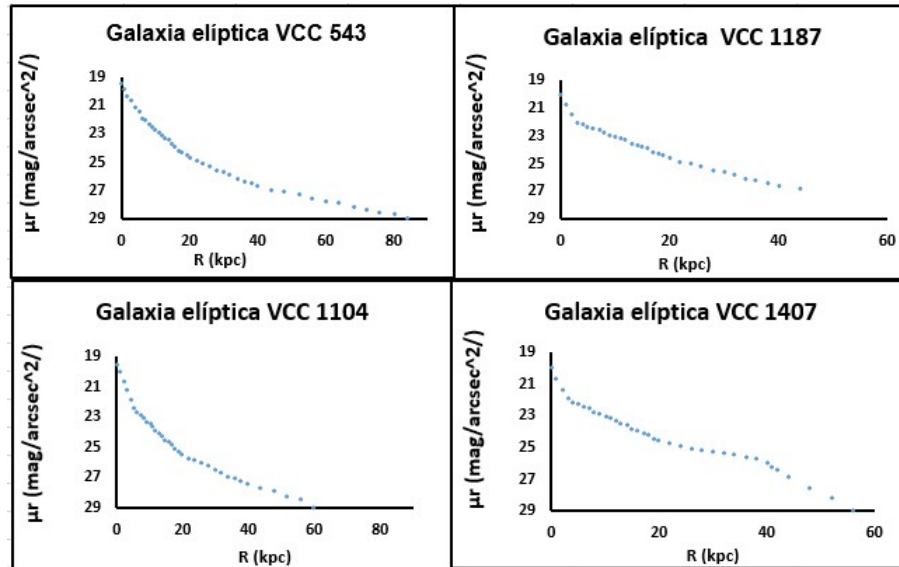


Figura 3.4: Perfil de Brillo Superficial de las Galaxias Elípticas *VCC543*, *VCC1187*, *VCC1407*, *VCC1104*. Datos Tomados de [22]

La Figura 3.4 muestra el perfil de brillo superficial de 4 galaxias elípticas, este brillo decrece en un radio entre 40 – 80 *Kpc*, esto se puede presentar por los componentes de las galaxias elípticas, los cuales son estrellas de población II.

3.1.4. Relación entre brillo superficial y luminosidad

Las anteriores ecuaciones 3.1 para galaxias espirales y 3.3 para galaxias elípticas, permiten conocer la luminosidad¹ L emitida por una galaxia, ya que ésta se relaciona con su brillo superficial promedio μ , tanto en galaxias elípticas como espirales.

Para determinar las luminosidades de las galaxias se necesita conocer la distancia que hay desde el observador hasta el centro de la galaxia como se ilustra en la Figura 3.5. Estas medidas de distancias se utilizan para estimar las masas de las galaxias, ya que estas estimaciones dependen del tamaño que tenga la galaxia.

Los métodos de medición de distancias se obtienen si hay alguna propiedad intrínseca entre

¹Es la potencia (cantidad de energía por unidad de tiempo) emitida en todas direcciones por un cuerpo celeste

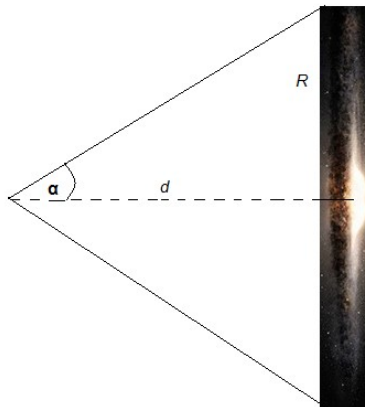


Figura 3.5: Distancia desde el observador hasta el centro de la galaxia. Imagen modificada de [12]

galaxias, que se correlacionan con su luminosidad total como el color, el brillo superficial y las velocidades internas de las galaxias. En este caso se utilizará el método que relaciona el brillo superficial con la Luminosidad, por medio de la siguiente definición, la cual se denomina **Ley del Inverso al Cuadrado** [9]:

$$F = \frac{L}{Area}, \quad (3.4)$$

$$F = \frac{L}{4\pi d^2}. \quad (3.5)$$

Siendo F el *flujo*², emitido por un cuerpo celeste. Observando la Figura 3.5 y al considerar que $d \gg R$ entonces, $\alpha = R/d$

$$f = \mu\alpha^2, \quad (3.6)$$

despejando μ que es el brillo superficial total, se obtiene la siguiente relación:

$$\mu = \frac{L}{4\pi R^2} (mag/arcsec^2) \quad (3.7)$$

Esta expresión permite conocer la *luminosidad* total de una galaxia, la cual está relacionada con el *flujo* F ; además permite interpretar el perfil de brillo superficial galáctico como un perfil

²Se utiliza la palabra *flujo* para referirse a la potencia de la luz que irradiada un objeto, el cual es captado por un observador, en todas las longitudes de onda

de luminosidad si se toma a $R = r/4\pi$ [12].

3.1.5. Razón Masa/Luminosidad

Por medio de estos estudios sobre la luminosidad intrínseca de las galaxias, ubicadas a distancias que pueden ser halladas, nos permite determinar la cantidad de materia que puede tener una galaxia y por consiguiente la potencia que esta irradia.

Para calcular la masa por medio de la razón (M/L) se toma como patrón de medida la razón (M_{\odot}/L_{\odot}) del Sol [12]:

$$M_{\odot} = 1,989 \times 10^{30} Kg, \quad (3.8)$$

$$L_{\odot} = 3,86 \times 10^{26} W, \quad (3.9)$$

entonces la razón $\frac{M_{\odot}}{L_{\odot}}$ será igual a:

$$\frac{M_{\odot}}{L_{\odot}} = 5,198 \times 10^4 Kg/W \quad (3.10)$$

Por tanto la masa que se encuentra en una galaxia esta distribuida conforme a su luminosidad [17], como se observa en la Figura 3.6, muestra los datos observacionales de 6 galaxias, donde se evidencia que la relación M/L tiende a ser constante en el núcleo y el disco ya que es allí en donde se concentra la mayor parte de la materia. De esta manera, la masa total encerrada en una esfera de radio r crecerá primero rápidamente, para $0 < r \leq r_{nucleo}$, luego empezara a permanecer constante a medida que el radio tiende al Radio de Holmberg $r \rightarrow R_H$ ³.

³ R_H es el Radio de Holmberg, considerado el límite óptico de la galaxia, corresponde al radio de la Isofota cuya magnitud es $26,5mag/arcsec^2$

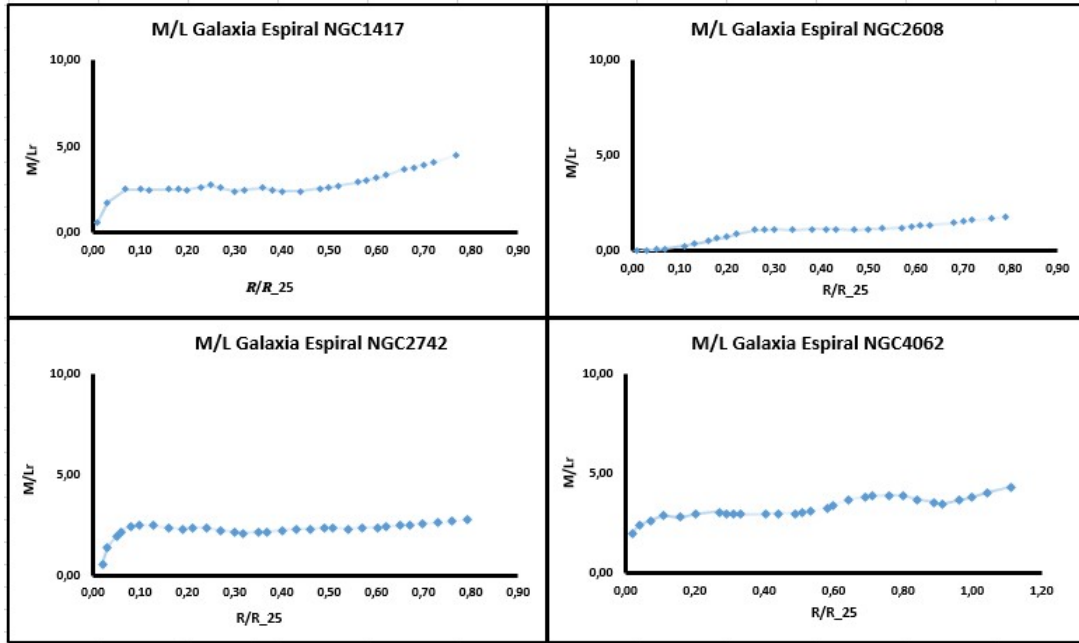


Figura 3.6: Razón M/L Vs Radio de las Galaxias espirales $NGC1417$, $NGC2608$, $NGC2742$, $NGC4062$, $NGC1087$ Y $NGC1421$, la Luminosidad es medida en la banda azul del espectro, el radio se da en múltiplos de la Isofota $25R_{25}$. Datos Tomados de [23]

3.1.6. Relación de Tully-Fisher

La luminosidad absoluta de una galaxia debería depender de su masa como vimos en 3.1.5, la masa, a su vez, es reflejada en las velocidades de las estrellas y el gas que se encuentra en las galaxias. La relación *Tully-Fisher* es una de las relaciones fundamentales para determinar distancias de galaxias espirales, fue establecida en 1977, como un método observacional que muestra que la velocidad de rotación de una galaxia aumenta con su luminosidad, como se observa en la Figura 3.7, según la siguiente relación:

$$L \propto v^n. \quad (3.11)$$

donde n puede tomar valores entre $3 \leq n \leq 4$ [29].

La Figura 3.7, muestra los perfiles globales de la velocidad $\Delta V(0)$, y las magnitudes absolutas entre un valor de $\mu_0 = 30,6^m$, a la medida de magnitud se realiza un ajuste visual de $0,2^m$ para un módulo de distancia más pequeño.

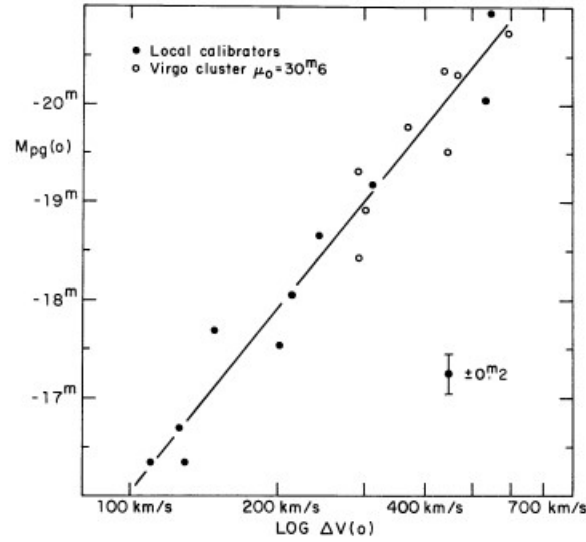


Figura 3.7: Gráfica Luminosidad/Velocidad, del Cluster de Virgo. Tomada de [29]

Según la ley de gravitación universal, si la distribución de la masa de todas las galaxias fuera esféricamente simétrica, la fuerza de la gravedad en el radio r , sería igual a la fuerza de gravedad de la masa en un sistema cerrado M_r . Esta aproximación, puede ser usada para el disco de las galaxias. Por lo tanto para el gas en órbitas circulares, se cumpliría $F_g = F_c$ [24].

$$G \frac{Mm}{r^2} = m \frac{v^2}{r}, \quad (3.12)$$

despejando el radio R

$$R = \frac{GM}{v^2}. \quad (3.13)$$

donde M es la masa encerrada dentro de la esfera de radio R y v es la velocidad orbital en el radio r [24].

Al reemplazar la ecuación 3.13 en 3.7, obtenemos:

$$L = \mu 4\pi \left(\frac{G^2 M^2}{v^4} \right), \quad (3.14)$$

despejando M^2 obtenemos:

$$\frac{v^4}{4\pi\mu G^2}L = M^2, \quad (3.15)$$

multiplicando por L en ambos lados de la igualdad y despejando L :

$$\frac{v^4}{4\pi\mu G^2}\left(\frac{L^2}{M^2}\right) = L, \quad (3.16)$$

reorganizando la ecuación 3.16:

$$L = \frac{v^4}{[4\pi\mu G^2(\frac{M_s}{L_s})^2]}, \quad (3.17)$$

si la masa de una galaxia espiral M_s es proporcional a la Luminosidad que esta emite L_s el termino $\frac{M_s}{L_s}$ serían constantes, entonces:

$$L = \frac{1}{cte}v^4, \quad (3.18)$$

Por tanto la masa total de una galaxia espiral M_s será proporcional a la Luminosidad total L_s que esta emite:

$$M_s \propto L_s. \quad (3.19)$$

3.1.7. Relación de Faber-Jackson

Los astrónomos Sandra M. Faber y Robert Earl Jackson en 1976 hallaron empíricamente la relación 3.20, donde la dispersión de las velocidades σ de las estrellas centrales de una galaxia elíptica se relaciona con la luminosidad total de la galaxia [22].

$$L \propto \sigma^n. \quad (3.20)$$

donde n puede tomar valores entre $3 \leq n \leq 4$.

En la Figura 3.8 se observan las correlaciones aparentes entre la dispersión de las velocidades v de las estrellas que están en el núcleo de la galaxia M32 y la magnitud absoluta, cuando $n = 4$ [22].

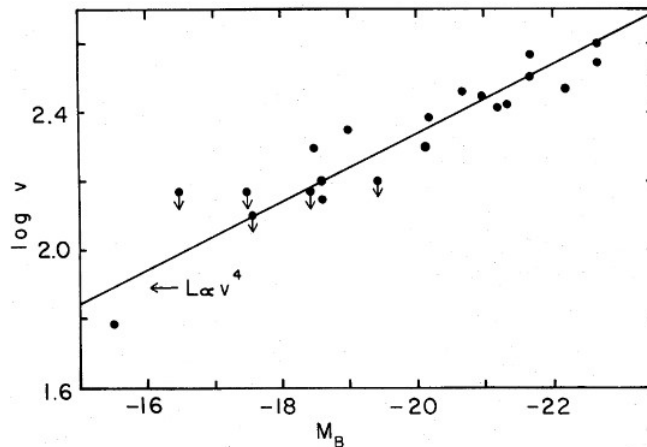


Figura 3.8: Línea de visión entre velocidades de dispersión y magnitud absoluta de la galaxia elíptica M32. Tomada de [22]

Según *S.M.Faber y Robert E.Jackson* en su artículo del año 1976 enuncia:

La medición de la dispersión de velocidades en una galaxia es importante [22], porque una fracción considerable de la energía cinética en estos sistemas que están en movimientos aleatorios, la dispersión de la velocidad puede ser usado para estimar la masa de la galaxia, aplicando el Teorema de Virial. Además, debido a que la dispersión de la velocidad no ha cambiado desde el colapso inicial de la galaxia. La energía cinética estelar es una medida de la energía de enlace por partícula y por lo tanto de la velocidad a la que se producen procesos de disipación durante la formación de galaxias [22].

El perfil de dispersión de velocidades σ , se relaciona con el radio R , por lo tanto para un sistema con simetría esférica y poca velocidad como las galaxias elípticas se cumple la siguiente relación:

$$R = \frac{3GM}{2\sigma^2}, \quad (3.21)$$

reemplazando la ecuación 3.21, en la ecuación obtenemos:

$$L = 4\pi\mu\left(\frac{9G^2M^2}{4\sigma^4}\right), \quad (3.22)$$

despejando M^2 , se obtiene la siguiente relación:

$$M^2 = \frac{\sigma^4}{9\pi\mu G^2} L, \quad (3.23)$$

Multiplicando a los dos lados de la expresión por L , y despejando L se obtiene:

$$L = \frac{\sigma^4}{[9\pi\mu G^2 (\frac{M_e}{L_e})^2]}, \quad (3.24)$$

según la razón $\frac{M_e}{L_e}$ son constantes, entonces:

$$L = \frac{1}{cte} \sigma^4, \quad (3.25)$$

La masa total de una galaxia elíptica M_e será proporcional a la Luminosidad total L_e que esta emite [6]:

$$M_e \propto L_e. \quad (3.26)$$

3.1.8. Cálculo de la masa dinámica de las galaxias

Curvas de rotación

Históricamente, las primeras mediciones de la curva de rotación fueron obtenidas por *Pease* en 1916 – 1918 para la galaxia *M104* [12]. Luego en el año 1939 *Babcock* determino la velocidad de rotación de la galaxia *M31*, en el desarrollo de su estudio tuvo preguntas como: *¿Cómo podemos determinar la distribución de masa por medio de la curva de rotación observada?* [3].

Si partimos de la base que las galaxias poseen un disco casi de simetría circular y que los cuerpos que se encuentran en las galaxias están ligados gravitacionalmente logrando un equilibrio dinámico, se puede calcular la distribución de masa de las galaxias, por medio de las velocidades de rotación de la galaxia a partir de observaciones de las líneas de emisión del Hidrógeno Ionizado *HII* que se encuentra en la región óptica de la galaxia, es decir en un radio casi $0,3R_H$. Estas curvas se construyen midiendo el desplazamiento Doppler de las líneas de emisión del *HII* [12]. Como resultado se obtiene que la Velocidad de Rotación V_R aumenta rápidamente con la distancia al centro galáctico y luego empiezan a decaer como se predice teóricamente convirtiéndose en una curva *Kepleriana* [3].

Brandt en 1960 obtuvo una curva de rotación de velocidades en un esfuerzo para determinar

la distribución de masa de galaxias espirales, donde realizó una parametrización empírica de la curva de rotación ajustándola a sus datos observacionales. La curva de rotación es en general una familia de curvas dada por:

$$V_{rot}(R) = \frac{\frac{V_{max}}{(R/R_{max})}}{[\frac{1}{3} + \frac{2}{3}(R/R_{max})^n]^{3/2n}}, \quad (3.27)$$

donde V_{max} es la máxima velocidad de rotación, R_{max} es el radio en que la velocidad máxima ocurre, n es un factor que indica qué tan rápido la curva se vuelve Kepleriana; esto impone que n tiene un cierto número de valores permitidos.

Brandt en su artículo enuncia:

Es conveniente observar que, para los sistemas infinitamente delgadas, no se necesita tal factor n , ya que las constantes en la ecuación 5.4 pueden determinar la masa. Sin embargo, estamos encajando las curvas de velocidad observadas cerca del centro de la galaxia, donde los efectos de espesor finito todavía están presentes. Por lo tanto, el factor mencionado anteriormente debe estar en la relación [3].

Las Figuras 3.9 y 3.10, muestran la curva de rotación de la galaxia M101, con el factor $n = 3$ y $n = 3/2$.

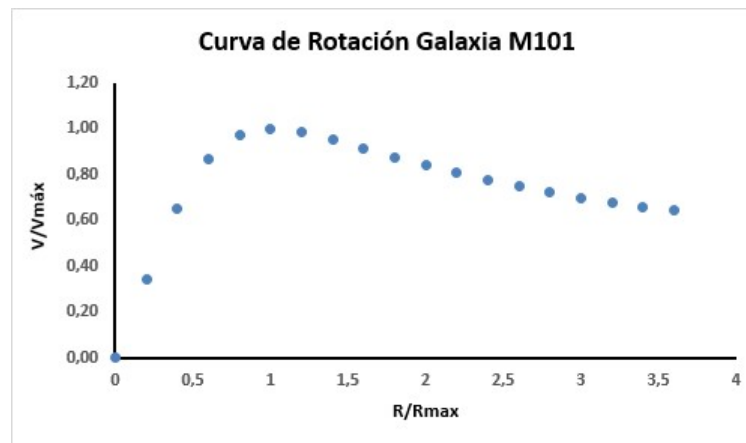


Figura 3.9: Curva de Rotación de la galaxia espiral M101 donde el factor $n = 3$ muestra la curva de rotación kepleriana. Tomado de [3]

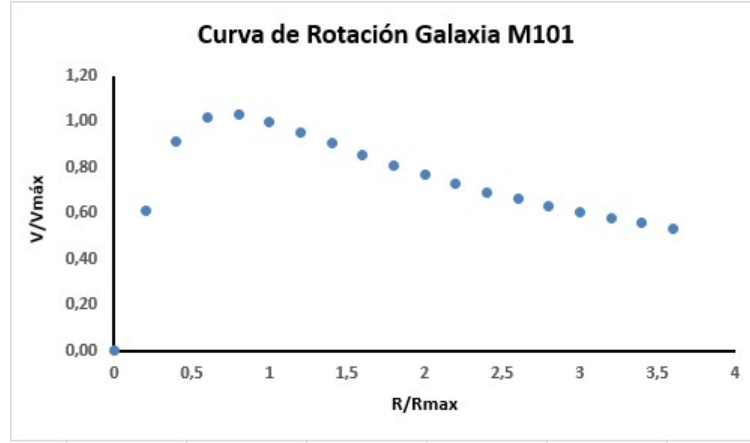


Figura 3.10: Curva de Rotación de la galaxia espiral $M101$ donde el factor $n = 3/2$ muestra la curva de rotación kepleriana. Tomado de [3]

La forma de la curva de rotación también proporciona información acerca de la distribución de masa en su interior según el *Teorema del Virial*.

$$2\langle T \rangle = -\langle V \rangle \quad (3.28)$$

ya que para un cuerpo que se encuentra en la galaxia y esta ligado gravitacionalmente su velocidad está descrita por la ecuación 2.5 y según el teorema del Virial, su velocidad será:

$$m_i^2 v(r_i) = \frac{GM(r_i)m_i}{r_i} \quad (3.29)$$

$$v(r_i) = \frac{GM(r_i)}{(r_i)} \quad (3.30)$$

Donde $m(r_i)$ es la masa encerrada en una esfera de radio r_i [21].

Después del año 1975 las observaciones que se realizaban a las galaxias para obtener las propiedades de rotación se extendieron más allá del límite óptico, estudiando el espectro de las regiones de Hidrógeno Neutro HI , estas regiones traspasan el Radio de Holmberg y ya no podían ser descritos con la relación 5.4 adecuadamente [17].

3.1.9. Cálculo de la curva de rotación a través de la línea de 21 cm del HI

Espectros

El espectro es la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas, está formado por líneas de emisión y absorción y el continuo que indica la función f_ν que abarca todas las frecuencias y las líneas del espectro, las líneas abarcan una región de frecuencias muy reducidas como consecuencia de la naturaleza cuántica de los niveles energéticos de los átomos o moléculas, emisores o absorbentes.

Radio Astronomía

La radio Astronomía representa una nueva rama de la astronomía, que estudia los cuerpos celestes a través de su espectro electromagnético en emisiones de frecuencia en la banda de radio[5], las ondas de radio tienen una longitud de onda mayor que la de la luz visible.

En radio astronomía para obtener buenas señales, se deben utilizar grandes antenas, la mayoría de los radiotelescopios utilizan una antena parabólica para amplificar las ondas, y así obtener una buena lectura de estas, ya que la luz visible es absorbida por el polvo que encuentra a su paso, pues su longitud de onda es comparable con el tamaño de las partículas de polvo; esto delimita su alcance aproximadamente $\sim 1kpc$ ⁴, es decir, la vecindad solar [25]. Las ondas de radio permite realizar observaciones de nuestra Galaxia sin ser limitadas por la presencia del polvo interestelar, estas alcanzan todos los rincones de la galaxia, gran parte de nuestro conocimiento sobre la estructura de nuestra Vía Láctea proviene de las observaciones de radio de la línea 21cm del hidrógeno neutro HI.

Línea de 21cm del Hidrógeno Neutro (HI)

La línea de 21cm producida por el Hidrógeno Neutro representa una herramienta muy valiosa para los astrónomos ya que por medio de ella se estudia la velocidad de rotación de las galaxias espirales, al observar las líneas del Hidrógeno a diferentes longitudes de onda a lo largo del plano Galáctico, a través de esta línea se puede mostrar que la velocidad angular aumenta a medida que nos acercamos al centro Galáctico[25].

El gas en el espacio interestelar es extremadamente frío, su temperatura puede estar en los (10 – 100K), a tan bajas temperaturas los átomos de hidrógeno se encuentran en su estado

⁴Un parsec pc equivale a $3,086 \times 10^{16}m$

electrónico base [26]. Esto quiere decir que el electrón tiene la energía mínima permitida y se encuentra lo más cercano que puede estar del núcleo. Un átomo de hidrógeno neutro se presenta cuando un electrón que orbita alrededor del núcleo, formado este último por un protón. Tanto el protón como el electrón tienen la propiedad de *espín*. Sus espines pueden tener el mismo sentido (*espines paralelos*) o sentidos contrarios (*espines anti-paralelos*).

La energía del átomo cuando los espines son paralelos es ligeramente mayor que cuando los espines son anti - paralelos, y por lo tanto cuando el átomo cambia del primer estado al segundo, emite un *fotón* de baja energía, el cual da origen a la línea espectral de 21 cm, que corresponde a una frecuencia de 1420MHz (Tomado de [25]).

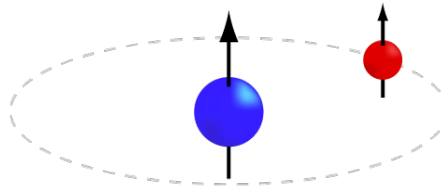


Figura 3.11: Hydrogen Line AntiParallel. Tomado de Wikipedia: Gráficos Taller/Ilustración/Top 4/Archivo/2013

La primera persona que calculó la línea de 21cm fue el astrónomo Neerlandés *H. C. van de Hulst* en 1944. Desde aquel entonces, las observaciones de hidrógeno han sido básicas para el estudio del universo en la cosmología [25].

Como el Hidrógeno es el elemento más abundante en el universo y en las galaxias, por tanto su radiación de la línea de 21cm puede detectarse a lo largo del plano de la galaxia, para estudiar su estructura; en particular, podemos conocer su curva de rotación y estimar su masa. El hidrógeno presenta un *Corrimiento Doppler* debido a la rotación de la Galaxia [25].

El Hidrógeno Neutro se mueve en el disco de la galaxia casi en órbitas circulares alrededor del centro galáctico [26], la velocidad radial V_r , medida a partir del desplazamiento Doppler que corresponde a la frecuencia medida f , está dada por:

$$V = c\left(\frac{f_0 - f}{f_0}\right). \quad (3.31)$$

donde $c = 299790\text{Km/s}$ y $f_0 = 1420\text{MHz}$.

3.2. Modelo Gravitacional de la curva de rotación galáctica

Si la galaxia rotara como un cuerpo rígido con una distancia R y esta distancia se mantuviera siempre constante, entonces la velocidad circular, V_c aumentaría linealmente con la distancia, R , al centro galáctico, específicamente como [25]:

$$V_c = \omega_g R, \quad (3.32)$$

siendo ω_g la velocidad angular de la Galaxia.

Pero resulta más adecuado si modelamos el movimiento Galáctico como un movimiento Kepleriano (siguiendo la tercera ley de Kepler), con velocidad angular que decrece constantemente cuando aumenta la distancia al centro de la Galaxia. Suponiendo que la masa M de uno de los componentes de la galaxia se encuentra a una distancia r del centro de la misma; entonces la velocidad circular de un objeto a una distancia R podría calcularse al igualar su aceleración gravitacional, con su aceleración centrípeta así [24]:

$$\frac{MG}{R^2} = \frac{MV^2}{R} \quad (3.33)$$

despejando la velocidad V

$$V = \sqrt{\frac{G}{R}}, \quad (3.34)$$

donde G es la constante gravitacional con un valor de $G = 6,67 \times 10^{-11} Nm^2 Kg^{-2}$, considerando la ecuación 3.32 vemos que la velocidad circular disminuye respecto a la distancia del centro galáctico, mediante la siguiente relación:

$$V_c \propto \frac{1}{\sqrt{R}} \quad (3.35)$$

3.3. Método observacional de la velocidad de rotación de la vía láctea

A continuación se presenta un modelo para hallar la curva de rotación de la vía láctea. Considerando la Figura 3,12 el Sol se encuentra en un brazo exterior a un radio R_0 del centro galáctico, describiendo una órbita circular. El gas se encuentra en una órbita interior a la del Sol, separado por un ángulo ℓ que indica la *Longitud Galáctica*, de la línea que une al Sol con el centro de la Galaxia, como se muestra en la Figura 3,12, donde CG representa el centro de la Galaxia, el Sol órbita con una ω_0 velocidad angular con respecto al centro de la galaxia.

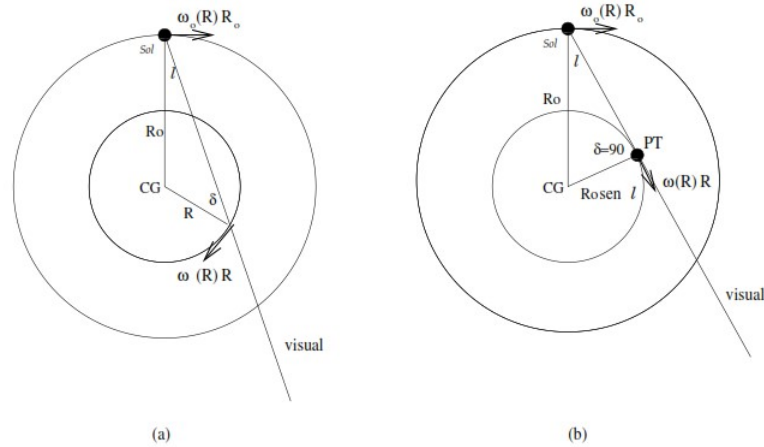


Figura 3.12: Modelo realista más simple para el disco galáctico, el Sol y todas las nubes HI están en órbitas circulares alrededor del centro galáctico. Tomada de (<http://www.cv.nrao.edu/course/astr534/HILine.html>) [26]

Con la Figura 3,12, la gráfica (a), se puede hallar la velocidad radial del gas realizando la diferencia de velocidades en la dirección de la visual, por medio de la siguiente relación:

$$V_{radial} = V_{gas} \sin \delta - V_{sol} \sin \ell = \omega R \sin \delta - \omega_0 R_0 \sin \ell, \quad (3.36)$$

donde V_{radial} es la velocidad del gas sobre la visual con respecto al Sol. Usando el teorema del seno, el ángulo δ es formado por el punto del gas en el plano de la visual y el centro galáctico.

$$\sin \delta = \frac{R_0 \sin \ell}{R}, \quad (3.37)$$

y sustituyendo en la ecuación 3.36 tenemos:

$$V_{radial} = (\omega - \omega_0)R_0 \sin \ell, \quad (3.38)$$

de esta manera se encuentra en la literatura la forma de describir la velocidad a la que se aleja de nosotros una estrella o nube de gas, pero también se puede escribir la velocidad radial en términos del ángulo δ ,

$$V_{radial} = (\omega - \omega_0)R \sin \delta, \quad (3.39)$$

En la línea visual se puede observar gas simultáneamente a distintos radios y velocidades, pero en particular se puede observar gas a radios grandes y velocidades pequeñas, o bien gas a radios pequeños pero con velocidades más grandes. Considerando entonces la ecuación 3.39, la V_{radial} es máxima cuando $\sin \ell = 1^\circ$, osea que $\ell = 90^\circ$; esto implica que la línea de visión sea *Tangente* a la órbita del gas como se ilustra en la Figura 3,12 la gráfica (b), por lo tanto se cumple:

$$R = R_0 \sin \ell. \quad (3.40)$$

siendo ahora R la distancia **CG** al punto tangencial, **PT**, como se muestra en la figura 3,12, gráfica (b), considerando lo anterior la ecuación 3.36 puede escribirse como:

$$V_{max} = V_{PT} - V_{sol} = \omega R - \omega_0 R, \quad (3.41)$$

donde V_{max} es la velocidad más alta que se puede observar sobre la línea de la visual dada y que corresponde a la frecuencia más baja medida, mientras que V_{PT} es la velocidad del gas en **PT**, siendo la que se pretende determinar para crear la curva de rotación de la Galaxia. Despejando de la ecuación 3,41 se obtiene:

$$V_{PT} = \omega R = V_{max} + \omega_0 R, \quad (3.42)$$

Los valores para la velocidad circular del Sol, $\omega_0 R_0$ y la distancia al centro Galáctico, R_0 , son:

$$\omega_0 R_0 = 220 Km/s \quad (3.43)$$

$$R_0 = 8,5 Kpc = 2,6 \times 10^{17} Km \quad (3.44)$$

3.3.1. Curva de Rotación de la Vía Láctea

Teniendo en cuenta el modelo gravitacional de rotación galáctica expuesto anteriormente, se puede estudiar la estructura global de la galaxia la **Vía Láctea**, basándose en el corrimiento Doppler de la línea de 21cm , como se realizó en centro de *Radioastronomía y Astrofísica de la UNAM*⁵, donde se utilizó la antena de $2,1\text{metros}$ para observar las líneas del Hidrógeno Neutro a diferentes longitudes a lo largo del plano Galáctico, desde $\ell = 0^\circ$ hasta $\ell = 90^\circ$.

Para este estudio realizado por el profesor *Stan Kurtz*[24], se tuvieron en cuenta factores como: la parte de la Vía Láctea donde se observa con el telescopio y el tamaño del haz de sensibilidad del telescopio, en este caso, el haz tiene un tamaño de aproximadamente 7° , lo cual es muy grande, así que hay mucho gas de la Vía Láctea, a velocidades distintas, que está contribuyendo al espectro. Si fuera un haz más pequeño (de una antena más grande) entonces el gas que cabe dentro del haz no cubre un rango tan grande de velocidades.

Las Figuras 3,13, 3,14 Y 3,15 muestran los espectros obtenidos para cada longitud Galáctica, en los cuales se determinó la V_{max} de la emisión relativa al *LSR*, este sistema hace referencia al movimiento medido de la materia presente en la Vía Láctea en las vecindades del Sol, ya que se debe tener presente el movimiento local del Sol y la Tierra [25], las longitudes galácticas presentadas son $\ell = 0^\circ$, $\ell = 40^\circ$ y $\ell = 90^\circ$.

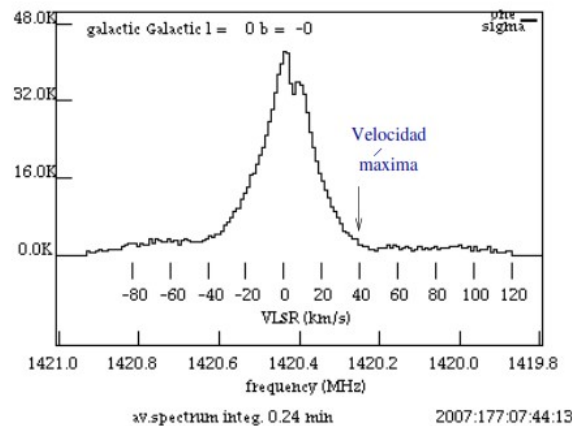


Figura 3.13: Espectro con longitud del plano Galáctico $\ell = 0^\circ$. Tomado de [25]

⁵Medición de la curva de rotación de la Galaxia Utilizando la Línea de 21cm del Hidrógeno Neutro. Este trabajo fue realizado durante una estancia del *XVIII Verano de la Investigación Científica* que organiza la Academia Mexicana de Ciencias, elaborado por Stan Kurtz, Hernández Gómez, A.Gómez, Y.

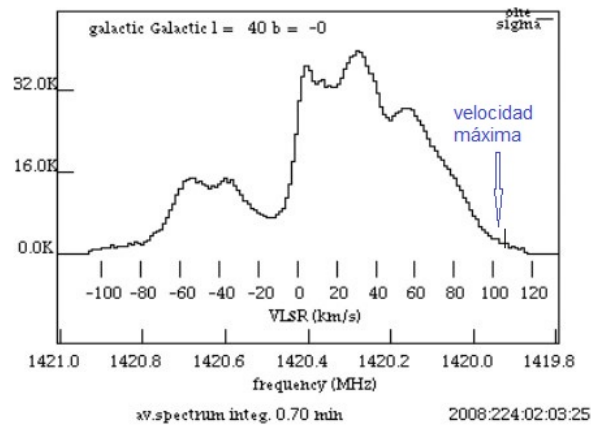


Figura 3.14: Espectro con longitud del plano Galáctico $\ell = 40^\circ$. Tomado de [25]

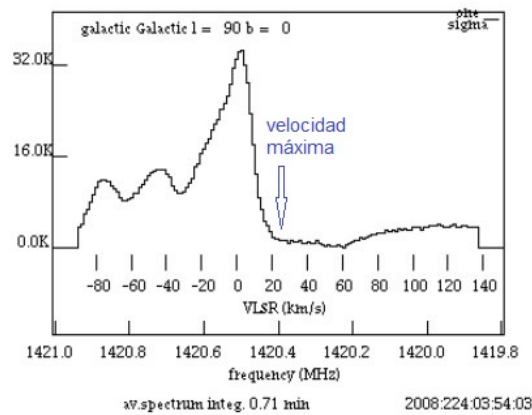


Figura 3.15: Espectro con longitud del plano Galáctico $\ell = 90^\circ$. Tomado de [25]

En la siguiente tabla se presentan los resultados de la V_{max} obtenidos por los espectros presentados y los valores calculados con las ecuaciones vistas en el método observacional de la curva de rotación.

Con los valores calculados de V_{PT} y R en la tabla, se puede crear la curva de rotación de la Vía Láctea, como se ilustra en la Figura 3.16.

Longitud galáctica (ℓ)	Velocidad Máxima (Km/s)	Distancia (Kpc)	R	$V_{Sol} = \omega_0 R$	V_{PT} (Km/s)
0	40	0		0	40
10	75	1.47		37.9	112.9
20	107	2.90		74.9	181.9
30	113	4.25		109.8	222.8
40	107	5.46		141.08	248.08
50	85	6.51		168.2	253.2
60	60	7.36		190.1	250.1
70	41	7.98		206.1	247.1
80	38	8.37		216.2	254.2
90	27	8.50		219.6	246.6

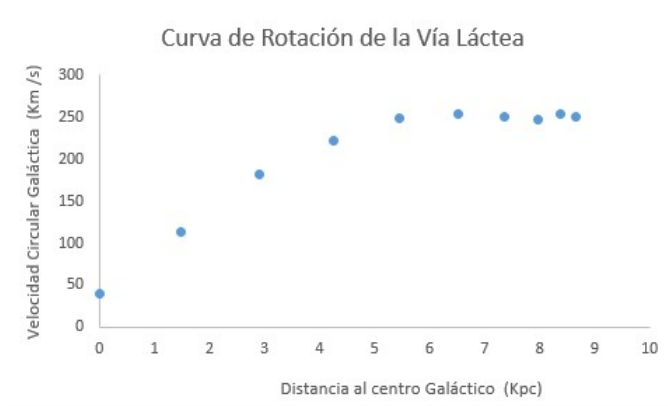


Figura 3.16: Curva de Rotación de la Vía Láctea, obtenida por los datos calculados siguiendo el modelo de rotación Galáctica 3.1.9

La Figura 3,16, presenta la curva de rotación de la Vía Láctea, la velocidad de la Galaxia no decrece como se pretende teóricamente al pensar que la velocidad circular del gas decrezca a razón de $\frac{1}{\sqrt{R}}$ como un movimiento Kepleriano, esta velocidad se mantienen prácticamente constante, para un radio aproximado de $R \sim 3Kpc$, lo que con lleva a pensar que la velocidad de la materia que está en el disco Galáctico, es casi la misma que la velocidad de la materia que está cerca del centro Galáctico.

3.4. Conexión entre la Materia Oscura y la velocidad de Rotación galáctica

Durante los años 70 se hicieron mediciones para saber la cantidad de masa que podría tener una galaxias. Las primeras mediciones fueron con las estrellas observando el brillo superficial, el cual esta relacionado con la Luminosidad de la estrella, después en su artículo Forbes [23] mediante sus datos observacionales concluye que la luminosidad es proporcional a la masa que puede tener una galaxia espiral, como se vio en la sección 3.1.5.

Algunos astrónomos como Tully - Fisher mostró la dependencia de la luminosidad total de una galaxia espiral con su Velocidad de rotación 3.11. Faber-Jackson relaciono la dispersión de velocidades de las estrellas con la Luminosidad total de la galaxia. Cuando realizaban las gráficas de estas velocidades en el límite óptico, se observaba que la curva de rotación obtenida cumplía con las leyes de Newton y decrecía de forma Kepleriana.

Después las observaciones se empezaron a realizar más allá del límite óptico, usando nuevos métodos de observación como el de la *Línea de 21cm* la cual es producida por el Hidrógeno Neutro, con una frecuencia de $1420MHz$, mediante el cual se halla la curva de rotación de la galaxia la Vía Láctea, como se observa en la Figura 3,16, esta curva de rotación no decrece como se había predicho teóricamente, si no que esta curva permanece constante.

Algunos astrónomos como *Vera Rubin, Van Alba y Kent* en su artículo de 1Junio1980, llamado *ROTATIONAL PROPERTIES OF 21 Sc GALAXIES WITH A LARGE RANGE OF LUMINOSITIES AND RADII, FROM NGC4605 (R = 4Kpc) TO UGC2885 (R = 122Kpc)*, muestran las velocidades a lo largo del eje mayor en el plano de cada galaxia, con $V_R = V_{obs} - V_0 / \sin i$, para galaxias con que el eje mayor ϕ es desplazado desde el ángulo de posición del espectro, por lo tanto la velocidad circular está dada por:

$$V_{(R)} = \frac{(V_{obs} - V_0)[\sec^2 i - \tan^2 i \cos^2(\eta - \phi)]^{1/2}}{\sin i \cos(\eta - \phi)} \quad (3.45)$$

$$R = s[\sec^2 i - \tan^2 i \cos^2(\eta - \phi)]^{1/2} \quad (3.46)$$

donde s es la distancia al centro del núcleo en el plano del cielo y R es la distancia del núcleo en el plano de la galaxia. Las curvas de rotación de al menos 75 galaxias espirales no decrecían

conforme aumentaba su radio, como se había predicho teóricamente, si no que permanecían planas hasta el límite observado [12].

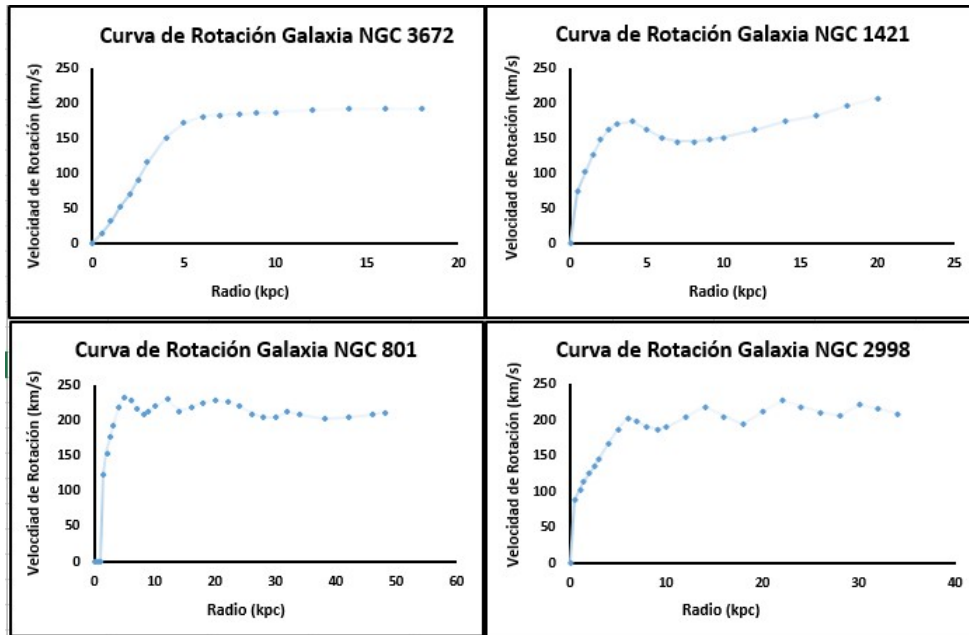


Figura 3.17: Curva de Rotación de las Galaxias *NGC3672*, *NGC1421*, *NGC2998*, *NGC801*, medida en el plano de la galaxia, en función del radio desde el núcleo. Datos Tomados de [15]

La Figura 3,17 muestra la curva de rotación de 4 de las 21 galaxias estudiadas por *Vera Rubin*, las curvas presentadas no decrecen conforme aumenta el radio R . Estas curvas muestran un aumento de velocidad bastante rápida, la mayoría de las curvas de rotación están aumentando constantemente, incluso en el punto más alejado de medición [15].

Esta diferencia en los cálculos de distribución de masa en las galaxias se ha llamado *Discrepancia de las masas* y constituye un problema de interés al darle la solución a esta discrepancia, la solución que se presenta es la existencia de una **Materia Oscura**, que solo puede ser detectada a través de sus efectos gravitacionales.

3.5. La Materia Oscura como solución a la discrepancia de las masas

De acuerdo con los estudios presentados anteriormente, la materia oscura supera en cantidad a la materia Luminosa en las regiones externas de las galaxias espirales. En 1973 *Ostriker, Peebles* presentaron argumentos que conducen a pensar que la materia oscura forma un halo que rodea las galaxias espirales, por medio de sus observaciones adjuntaron evidencia que soportaba dicha afirmación [12]. La Figura 3,18 muestra la discrepancia al comparar los datos en la galaxia *NGC3198*, donde se puede observar la curva de rotación teórica superpuesta a la curva de rotación hallada por medio de los datos observacionales, esta comparación postulo la materia oscura como solución a este aumento de velocidad.

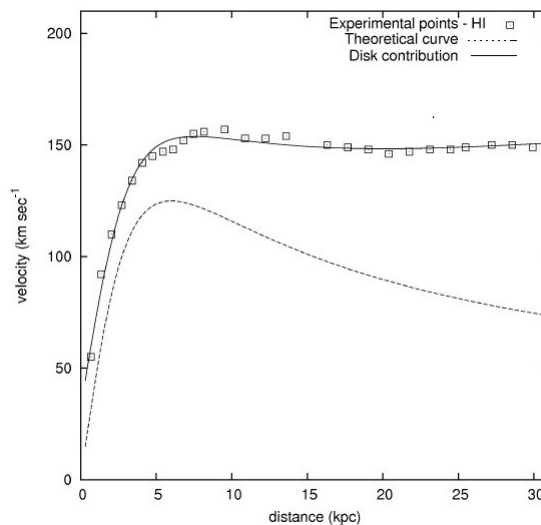


Figura 3.18: Curva de Rotación de la Galaxia espiral *NGC3198*, muestra la curva teórica con la línea punteada a partir de la materia visible en su disco, la curva de rotación observada y su ajuste con la línea continua. Tomada de Physics.org

3.5.1. Naturaleza de la Materia Oscura

Evidencias observacionales refieren que solo conocemos de nuestro universo un pequeño porcentaje, el cual contienen (*hidrógeno, helio, estrellas, neutrinos y elementos pesados*) y el restante, llamado componente oscuro, aun es de naturaleza desconocida. La dinámica del universo, y de

sus objetos, es afectada por este tipo de materia, la cual es detectada por sus efectos gravitacionales, en oposición a la materia luminosa que puede detectarse por las ondas electromagnéticas que emite [19]. La materia oscura mantiene *Bariones* juntos para formar galaxias, grupos y cúmulos de galaxias, estas contienen insuficiente masa para proporcionar la intensidad gravitacional que las mantenga juntas, así que la materia oscura proporciona la fuerza gravitacional necesaria para esto. La naturaleza de la materia oscura suele ser objeto de estudio y se han presentado diferentes modelos a fin de conocer su contenido [2], entre las categorías de la materia oscura son [18]:

Naturaleza Bariónica: cuyos candidatos podrían ser los gases luminosos, planetas, las enanas marrones y negras, agujeros negros, objetos compactos y masivos de los halos galácticos, llamados **MACHOs** *Massive Astrophysical Compact Halo Object*, entre otros. Sin embargo, hasta el momento los resultados obtenidos parecen indicar que incluso sumando la masa estimada de todos los MACHOs existentes alrededor de nuestra galaxia, ese valor sería suficiente para dar cuenta de apenas un 20 por ciento de toda la materia oscura presente en la Vía Láctea [18].

Naturaleza no Bariónica: pueden ser, los Neutrinos masivos. Los neutrinos y antineutrinos se desacoplaron de la materia en la época temprana del universo. La densidad esperada de energía es el 70 por ciento de los fotones, es decir, despreciable comparada con la materia de la época actual. Pero el flujo de neutrinos es indetectable con las técnicas presentes, sin embargo, los neutrinos podrían hacer una contribución dominante a la materia del universo si tuvieran una masa diferente de cero, aspecto que en la actualidad, de los tres neutrinos distintos, se sabe con certeza que dos tienen masa [18]. Otros candidatos son las partículas masivas débilmente interactuantes **WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles)**, como se ilustra en la Figura 3,19:

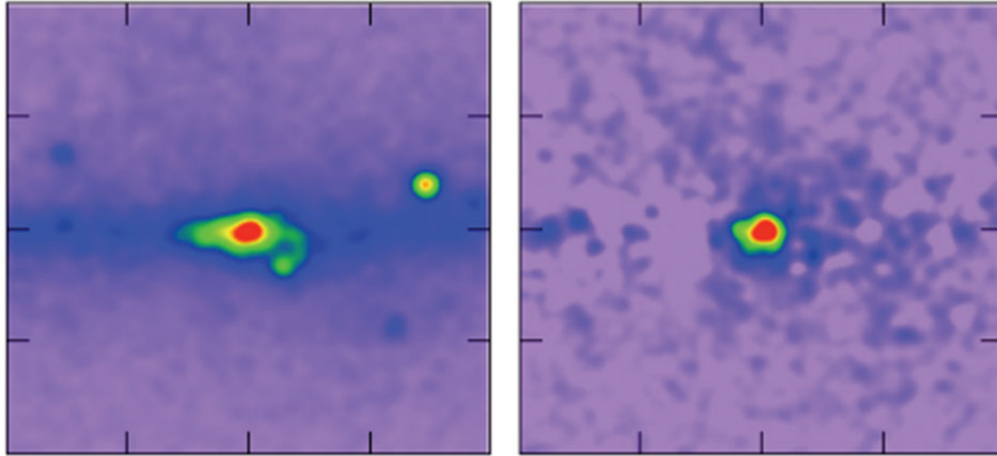


Figura 3.19: Imagen del centro galáctico región en rayos gamma se muestra arriba a la izquierda. Un emocionante modelo hipotético que parece encajar el exceso implica un tipo de materia oscura conocida como WIMPs , que puede estar colisionando con ellos mismos para crear los rayos gamma detectados. Tomado de Daylan et al, Fermi telescopio espacial, la NASA

Una fracción significativa de la materia oscura podría estar en forma de **Materia Oscura Fría (CDM)** probablemente en forma de WIMPs que no interactúan con la fuerza electromagnética o con la fuerza nuclear fuerte. Entre ellos están los axiones, neutralinos, gravitinos, fotinos, higgsinos y monopolos magnéticos. Según algunas teorías cosmológicas y la **GUT (Gran Unification Theory)**, estas partículas deben existir, sin embargo ninguna ha sido detectada experimentalmente [12].

Capítulo 4

ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN

Para la elaboración del presente trabajo se realizó una recopilación de artículos, los cuales fueron de gran utilidad para el desarrollo del marco teórico. Después se realizó un módulo didáctico como una propuesta de apoyo para la labor docente en la enseñanza de la Astronomía moderna, específicamente el estudio de la formación, morfología y comportamientos físicos de las Galaxias, para así introducir la teoría de la materia oscura.

Este módulo puede ser implementado en programas de formación universitaria, que sean afines con la Física y la Astronomía. Ha sido estructurado por medio de una serie de actividades, las cuales atienden rigurosamente los requerimientos necesarios para el desarrollo de competencias disciplinares, siendo estas fundamentales en el momento de enseñanza y aprendizaje de la astronomía. Así mismo cuenta con recursos tecnológicos de la Información y la Comunicación (**TIC**), ya que la implementación de la tecnología en la educación puede verse como una herramienta de apoyo que facilita la comprensión de los temas, no viene a sustituir al maestro, sino pretende ayudarlo para que el estudiante tenga más elementos (*visuales y auditivos*) enriqueciendo el proceso de enseñanza aprendizaje (María del Pilar Sepúlveda Ruiz, 2007).

El modelo pedagógico propuesto para el desarrollo de este módulo es por medio del **Aprendizaje Basado en Problemas ABP** (Commons, 2008), este modelo didáctico permite que los estudiantes se involucren de forma activa en el desarrollo de su propio aprendizaje. Barrows (1986) define al **ABP** como *Un método de aprendizaje basado en el principio de usar*

problemas como punto de partida para la para la adquisición e integración de los nuevos conocimientos. Esta metodología esta centrada en el aprendizaje, la investigación y la reflexión que siguen los estudiantes para llegar a una solución ante un problema planteado por el profesor.

Las actividades planteadas en el modulo pueden desarrollarse en forma secuencial, en un tiempo de 3 a 4 sesiones de una clase, cada una mínimo de dos horas, teniendo en cuenta que el docente puede sugerir tareas o actividades adicionales.

Durante el primer semestre del 2016 se realizaron dos implementaciones del presente módulo, la primera se realizó en el curso de Astronomía General, del Departamento de Física de la Universidad Pedagógica Nacional, con una población de 22 estudiantes los cuales tienen diferente formación disciplinar, ya que esta electiva es abierta a todo programa, el desarrollo de las actividades en esta primera parte constaron de tres sesiones. La segunda implementación se realizó en una sesión con el Semillero de Astronomía del Departamento de Física, de la Universidad Pedagógica Nacional, con una población de 9 estudiantes.

EL desarrollo de las actividades de la primer implementación se llevó a cabo en tres momentos siendo el orden de estos de la siguiente manera:

Primera sesión:

Inicialmente se presento el módulo y se realizo una breve contextualización del tema a desarrollar en el trabajo de grado. En esta sesión se desarrollo la primera actividad del módulo, la cual tiene como objetivo conocer las ideas previas que tenían los estudiantes con respecto a las galaxias y sus características físicas como: forma, color, etc. Se presentaron 10 imágenes de diferentes galaxias, los estudiantes tenían que buscar una forma de clasificar estas galaxias, basándose en sus propios criterios, estos debían ser escritos.

A medida que se presentaban las imágenes los estudiantes realizaron varias preguntas con respecto a las diversas formas que tienen las galaxias, estas preguntas hicieron que se desarrollará la actividad de una manera activa, es importante resaltar que varios estudiantes tenían conocimientos muy vagos sobre las galaxias, a pesar de esto los estudiantes realizaron preguntas orientadoras para realizar la actividad de una forma dinámica, la Figura 4,1 presenta los resultados obtenidos por la estudiante *Paula Andrea Sánchez Fúquene*, sus criterios de clasificación fueron: forma, luminosidad, color, brazos, núcleo.

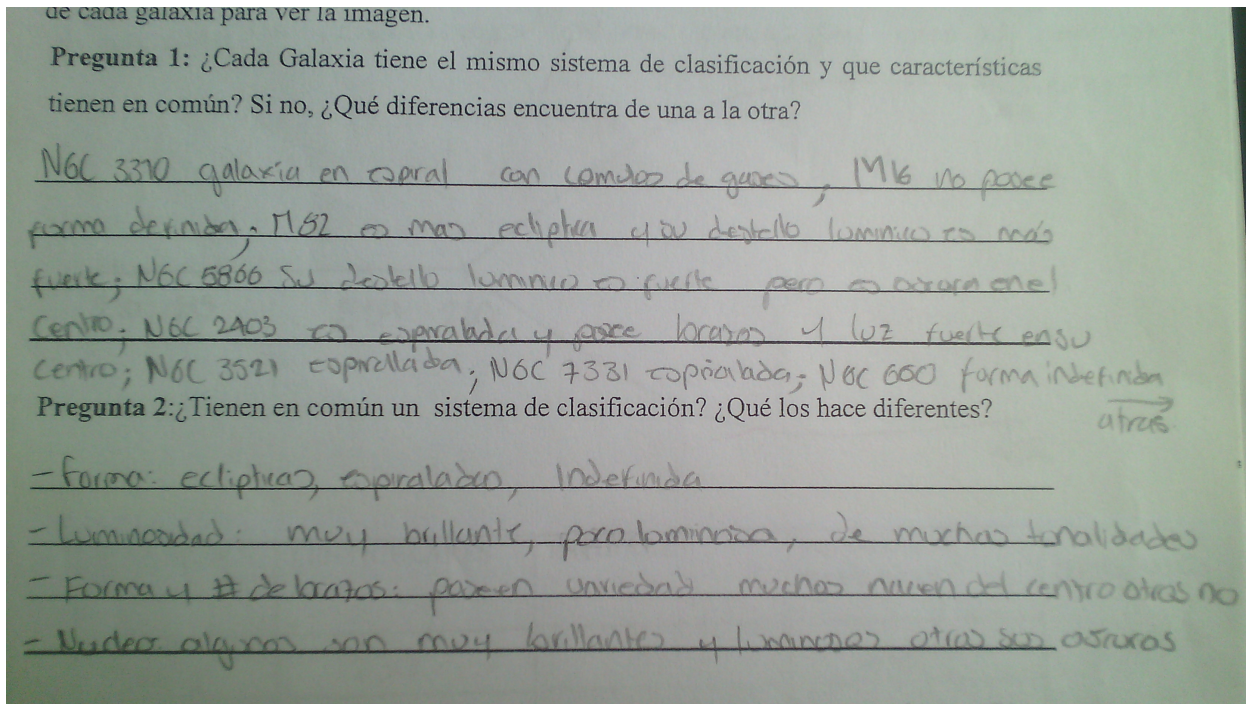


Figura 4.1: Actividad 1. Estudiante Paula Andrea Sánchez Fúquene

Segunda Sesión:

La segunda sesión se llevo a cabo en la sala de sistemas, se presento la página interactiva del SLOAN y los sistemas de clasificación de galaxias, el objetivo de esta sesión era que los estudiantes conocieran las galaxias dependiendo su morfología y los criterios que se usaron para clasificarlas, según el diagrama Hubble.

En el desarrollo de la segunda actividad, se presento el sistema de clasificación Hubble, la mayoría de los estudiantes indicaron que ellos habían clasificado las galaxias de la actividad 1 teniendo en cuenta las características que podían observarse en las imágenes como color, forma, brillo. Se evidencio que los estudiantes presentaban gran interés por conocer este sistema de clasificación, ya que realizaban preguntas y desarrollaron activamente la actividad. La Figura 4,2 , muestra los resultados obtenidos por el estudiante *Carlos Guzmán*, se puede observar que las características físicas que tuvo en cuenta para clasificar las galaxias, también son consideradas en el diagrama Hubble.

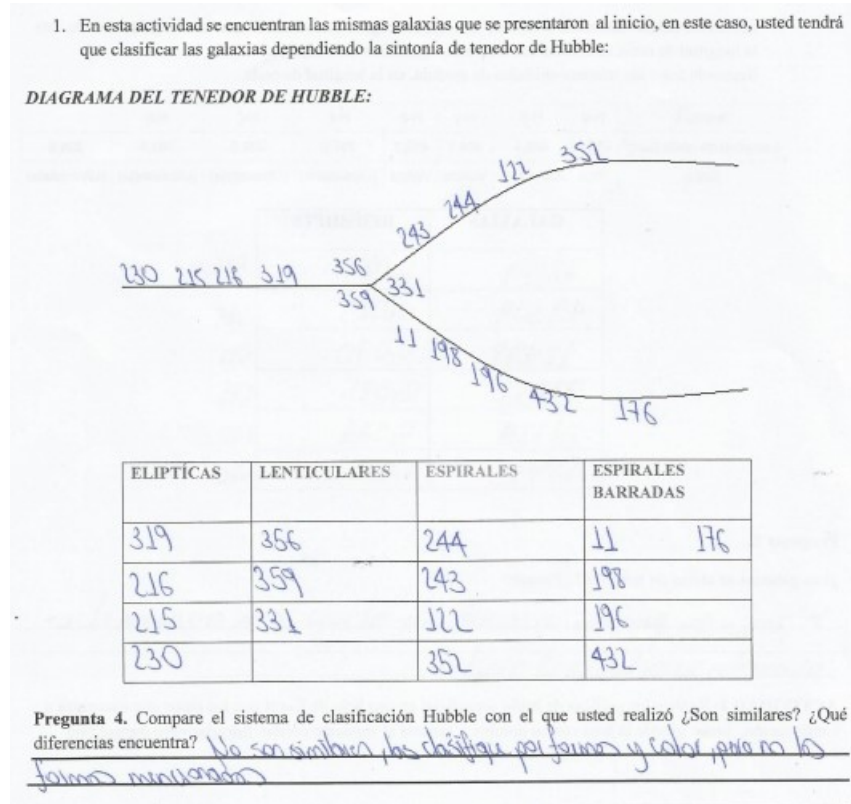


Figura 4.2: Actividad 2. Estudiante Carlos Guzmán

Tercera Sesión:

En la tercera sesión se presentó el espectro de dos galaxias, como la distribución de intensidad de la radiación electromagnética, emitida o absorbida por una muestra de sustancia, en función de la longitud de onda (frecuencia) de dicha radiación. Los estudiantes tenían que calcular el Corrimiento al rojo Z de 3 líneas diferentes de un espectro y 3 líneas diferentes del segundo espectro, con la siguiente relación matemática:

$$z = \frac{\lambda_{observada} - \lambda_{emitida}}{\lambda_{emitida}} \tag{4.1}$$

La Figura 4,3 muestra los resultados obtenidos por la estudiante *Karen Alejandra Rojas*, en su diagrama ubico las galaxias dependiendo la forma, elíptica y los brazos de las espirales.

Después de la actividad, se presentaron los métodos que se han usado para calcular la distribu-

ACTIVIDAD 3:
 Encuentra desplazamientos al rojo de las galaxias que utilizó en el ejercicio 1 Volver al Explorador de objetos utilizando los enlaces de abajo.

La expresión matemática para determinar el corrimiento espectral, es por medio de la siguiente relación:

$$z = \frac{\lambda_{observada} - \lambda_{emitida}}{\lambda_{emitida}}$$

1. Encuentra desplazamientos al rojo de las siguientes galaxias, recuerda que en la siguiente tabla esta la longitud de onda se emiten los elementos químicos individuales. Recuerde tener las mismas unidades de medida, en la longitud de onda.

Nombre	H-α	H-β	H-γ	H-δ	H-ε	H-ζ	H-η
Longitud de onda (nm)	656.3	486.1	434.1	410.2	397.0	388.9	383.5
Color	Rojo	Azul-verde	Violeta	Violeta	(Ultravioleta)	(Ultravioleta)	(Ultravioleta)

GALAXIAS		REDSHIFTS		$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{em}}{\lambda_{em}}$
Elemento Q				
G ₁	H _β 5091,095	0.0043	4862,7	
G ₁	H _β 4979,664	0.0024	4862,7	
G ₁	H _γ 6848,512	0.0043	6564,6	
G ₁	H _δ 3983,323	0.0024	3890,2	
G ₁	H _ε 6718,928	0.0024	6564,6	
G ₁	H _ζ 4199,523	0.0024	4102,9	

G₁ = Galaxia 1
 G₂ = Galaxia 2

Pregunta 5:
 ¿Las galaxias se alejan de nosotros? ¿Porque?

Figura 4.3: Actividad 3. Estudiante Karen Rojas

ción de masa en las galaxias, por medio de la presentación de las gráficas de brillo superficial de las galaxias espirales y elípticas, y la curva de rotación de la galaxia M101 hallada teóricamente por medio de la parametrización empírica realizada por Brandt en 1960.

Luego se presento la curva rotación de la Vía Láctea, obtenida por medio de datos observacionales, esta curva de rotación no decrecía, como mostraba la curva de rotación con datos teóricos.

Al comparar las dos curvas de rotación (teórica y observacional), se presento el problema de la discrepancia de las masas, de esta manera se relaciono esta discrepancia con la materia oscura, la cual no emite ninguna radiación electromagnética que pueda ser detectada, pero si ejerce una fuerza gravitacional haciendo que la velocidad de rotación de la galaxia permanezca constante

sin importar la distancia del centro galáctico, no se enfatizo en decir los componentes de la materia oscura ya que no es objetivo del proyecto de grado.

Segunda Implementación

Con los estudiantes del Semillero de Astronomía del Departamento de Física se realizo una contextualización del trabajo de grado, como se clasifican las galaxias y los métodos usados para la medición de la masa de las galaxias. Se desarrollo específicamente la actividad 7 del modulo, esta actividad tenía como objetivo que los estudiantes graficarán la curva de rotación de la galaxia la Vía Láctea, por medio del modelo de rotación galáctica.

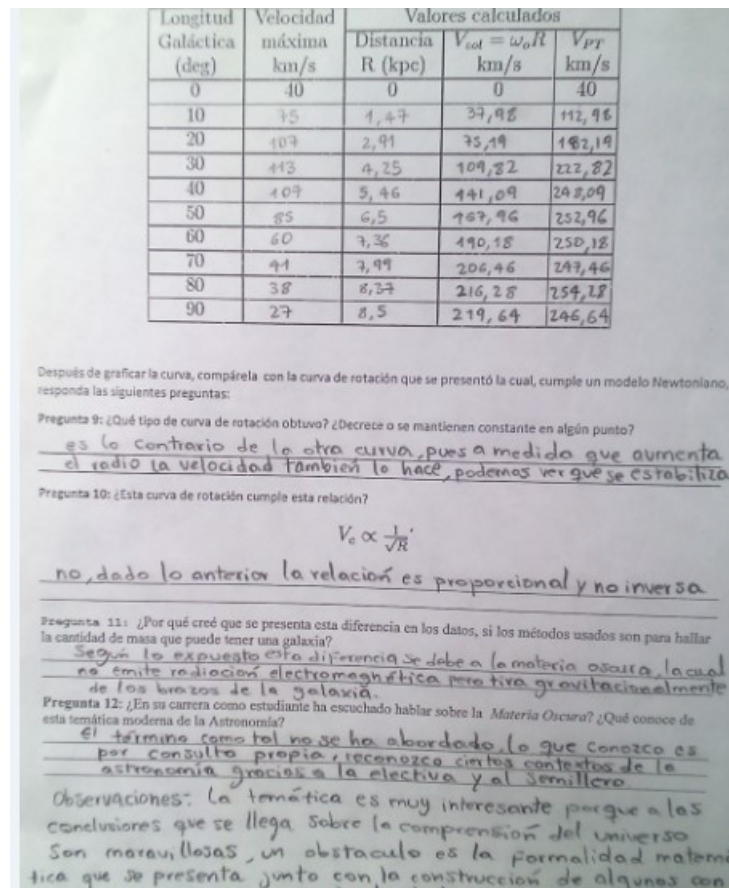


Figura 4.4: Actividad 7. Datos hallados para la gráfica de la curva de rotación de la vía láctea, elaborados por el estudiante Nicolás Molina

Para esto tenían que calcular los datos de la velocidad máxima del Hidrógeno Neutro (HI), como se observa en la Figura 4,4, al tener los datos calculados hicieron la gráfica de la curva de rotación de la Vía Láctea. La Figura 4,5 muestra la curva de rotación obtenida por el estudiante *Nicolás Molina*, al observar este resultado los estudiantes hicieron preguntas del porque no cumplía la relación $V_c \propto \frac{1}{\sqrt{R}}$.

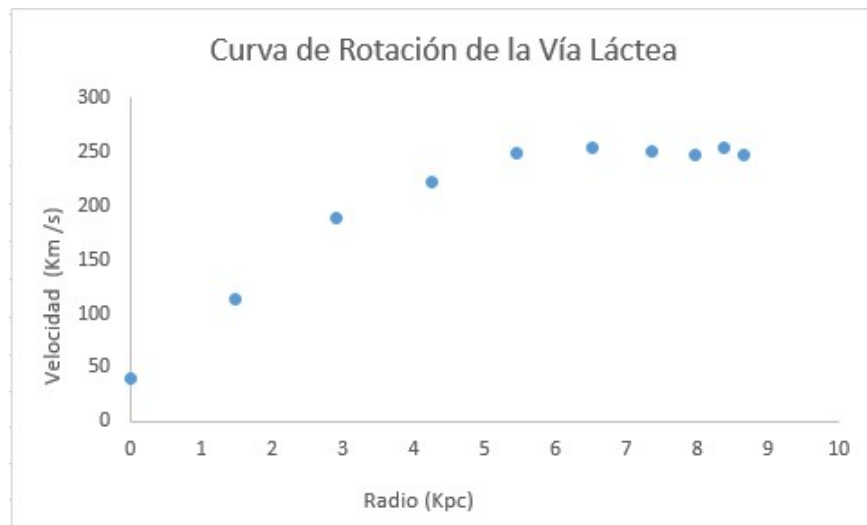


Figura 4.5: Actividad 7. Curva de rotación de la vía láctea, realizada por el estudiante Nicolás Molina

Al tener las curvas de rotación (teórica y observacional), se compararon para poder introducir el concepto de materia oscura, la cual no emite ninguna radiación electromagnética que pueda ser detectada, pero si ejerce una fuerza gravitacional haciendo que la velocidad de rotación de la galaxia permanezca constante sin importar la distancia del centro galáctico, no se enfatizo en decir los componentes de la materia oscura ya que no es objetivo del proyecto de grado.

Los estudiantes en sus conclusiones y aportes indicaron:

El tema es fundamental en términos de las evoluciones históricas de la cosmología, caracterizan la masa de las galaxias a través de su dinámica, es una forma interesante de poner en contexto las leyes de Newton, algo fundamental en los procesos de enseñanza de las ciencias (Nicolás Molina).

Aunque no conocía la temática de las galaxias y la materia oscura, la aproximación que se hizo a lo que es la materia oscura y su influencia en las mediciones de velocidades de las galaxias logre comprender de que se trata (Dylan Llanos).

El estudiante estuvo presente en las dos implementaciones, su conclusión fue: *La implementación fue más clara y permite ver que si hay un conocimiento necesario para abordar estos temas, es más claro y fácil para los estudiantes que desarrollen las actividades, comprender el tema si se tiene una idea previa (Jairo Alvarez).*

Capítulo 5

CONCLUSIONES

- Durante el desarrollo del presente trabajo, se realizó la descripción morfológica de las galaxias, mostrando los criterios de clasificación usados por Hubble, para esto se usó la página web del SLOAN como herramienta de apoyo visual, en donde los estudiantes pudieron observar mejor las galaxias, al acercarlas, ver sus colores y formas.
- Se contextualizó la problemática de la curva de rotación de velocidades de las galaxias regulares por medio del modelo gravitacional Newtoniano y los trabajos de Tully -Fischer y Faber-Jackson, esta descripción de la curva de rotación se encuentra en la región del óptico visible, lo que permitía hablar de los primeros estudios realizados para calcular la masa de las galaxias.
- A partir del trabajo de radioastronomía y astrofísica de la UNAM, se obtuvo la curva de rotación de la Vía Láctea, basado en el espectro de la línea $21cm$ del Hidrógeno Neutro, se extrajo la velocidad máxima, con la cual se obtuvo la curva de velocidades, este trabajo fue una parte fundamental para el entendimiento de la dinámica en las galaxias y por consiguiente, introducir la teoría de la materia oscura como solución a la discrepancia de los datos teóricos y observacionales en el cálculo de la masa de las galaxias, ya que esta curva de rotación evidencia, que las velocidades no decrecen a medida que aumenta el radio sino permanecen constantes.
- Se elaboró el módulo como material didáctico, con una serie de actividades secuenciales, las cuales aportan al conocimiento de las galaxias y la comprensión e interiorización de la temática moderna de la materia oscura.

- Con la primera implementación del módulo, se puede concluir que el módulo se puede desarrollar hasta la actividad 3, con estudiantes de diferente formación disciplinar, ya que se evidencio gran interés en los estudiantes por conocer cómo se clasifican las galaxias por su color, forma, brillo.
- Teniendo en cuenta la evaluación hecha por los estudiantes de la clase de astronomía general, es de vital importancia contar con el computador para el acceso a la plataforma del SLOAN, y la elaboración de las gráficas planteadas, ya que de esta manera se comprende mejor la temática.
- Es importante aclarar que en el momento que se quiera implementar el módulo, debe ser a una población que tenga conceptos previos asociados a la astronomía, ya que los estudiantes de la segunda implementación pertenecen al semillero de astronomía, por lo tanto se evidencio una mejor comprensión del tema.

Bibliografía

- [1] Catalogo morfológico de galaxias. <http://www.ifca.unican.es/users/g serrano/Docencia/Galaxias/GAL> Online; accessed 25-Septiembre-2015.
- [2] The dark side of cosmology: Dark matter and dark energy. *Special Section, General Relativity*, págs. 439–456.
- [3] En la distribución de la masa en las galaxias. i. la estructura a gran escala de espirales ordinarias con aplicaciones a m 31.
- [4] Estructura y propiedades cinemáticas de la galaxia en latitudes intermedias galácticos. *arXiv pre-impresión astro-ph / 9511049*.
- [5] *Fundamental Astronomy, Fifth Edition*.
- [6] *Galaxias en el universo: una introducción*.
- [7] Incorporación de las TIC a la enseñanza de la física: Laboratorios virtuales basados en simulación. *Revista Iberoamericana de Educación en Tecnología y Tecnología en Educación*.
- [8] *Introducción a la Astrofísica*.
- [9] *Introducción a la astronomía y la astrofísica*. Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica.
- [10] La existencia y la naturaleza de la materia oscura en el universo. *Examen anual de la astronomía y la astrofísica*.
- [11] La materia oscura en las galaxias espirales. i-galaxias con curvas de rotación óptica,. *La Astronomical Journal*, págs. 1301–1327.

- [12] Materia oscura en las galaxias regulares, author=Mónica Eilene Valencia Duarte, year=2003.
- [13] *math, Harvard*. Tesis Doctoral.
- [14] Nuevas tecnologí i como exponenciales de la universidad de la singularidad, la nasa.
- [15] propiedades de rotación de las galaxias 21 sc con una amplia gama de luminosidades y radios, desde ngc 4605 / r = 4kpc / a ugc 2885 / r = 122 kpc. *La revista Astrophysical Journal*, págs. 471–487.
- [16] Sdss. En *Ciencias con estudios del cielo astronómico infrarrojo cercano*.
- [17] superficie de la fotometría ccd de galaxias de campo. ii-ardenas / descomposiciones de disco. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, págs. 115–159.
- [18] *Materia Oscura A partir del sector de escalar de Modelos 3-4-1*. Tesis Doctoral, 2010.
- [19] A Bosma, E Athanassoula, y JM van der Hulst. A 21-cm line study of ngc 5963, an sc galaxy with a low-surface brightness disk. *Astronomy and Astrophysics*, 198:100–108, 1988.
- [20] Joaquín Alvira Enríquez y Omar López Cruz. Modelado bidimensional de la distribución de brillo superficial galáctico; implicaciones hacia la clasificación morfológica cuantitativa de las galaxias. 2007.
- [21] Joaquín Alvira Enríquez y Omar López Cruz. Modelado bidimensional de la distribución de brillo superficial galáctico; implicaciones hacia la clasificación morfológica cuantitativa de las galaxias. 2007.
- [22] SM Faber y Robert E Jackson. Velocity dispersions and mass-to-light ratios for elliptical galaxies. *The Astrophysical Journal*, 204:668–683, 1976.
- [23] DA Forbes y DL Depoy. Near-infrared surface photometry of ngc 253. *Astronomy and Astrophysics*, 259:97–100, 1992.
- [24] Gómez Y. Kurtz S. Hernández Gómez, A. Medición de la cura de rotación de la Galaxia utilizando la línea de 21cm del hidrogeno neutro. "<http://www.crya.unam.mx/~radiolab/Estudiantes/CNF-Antonio.pdf>.

-
- [25] S. Hernández-Gómez, A. y Kurtz. Medición de la curva de rotación galáctica. *Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Universidad Autónoma de Coahuila, Centro de Radioastronomía y Astrofísica UNAM, Campus Morelia*, págs. 1 – 10, 2013.
- [26] S Kurtz. The hi 21cm line. *The Astrophysical Journal*, 261:439–456, 1982.
- [27] Carlos Andrés Otálora MAURICIO MENDIVELSO VILLAQUIRAN. Mond como posible solución a la discrepancia de masas en galaxias espirales. *Universidad Pedagógica Nacional - U.P.N.*, 2003.
- [28] Lillian C McDermott y Edward F Redish. Resource letter: Per-1: Physics education research. *American journal of physics*, 67(9):755–767, 1999.
- [29] R Brent Tully y J Richard Fisher. A new method of determining distances to galaxies. *Astronomy and Astrophysics*, 54:661–673, 1977.

Capítulo 6

ANEXOS

GUÍA DE APRENDIZAJE SOBRE LA DINÁMICA DE LAS GALAXIAS



Figura 6.1: portada

CARLA VIVIANA MONTAÑO BALLÉN
UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

6.1. PRESENTACIÓN

Este módulo didáctico es una propuesta diseñada con el fin de optar por el título de Licenciatura en Física de la Universidad Pedagógica Nacional. Pretende ser un material de apoyo para la labor docente en la enseñanza de la Astronomía moderna, específicamente el estudio de la formación, morfología y comportamientos Físicos de las Galaxias.

Este módulo puede ser implementado por un profesor universitario en los programas de formación de profesores de Física y en espacios de Astronomía. Ha sido estructurado por medio de una serie de actividades para los estudiantes, las cuales atienden rigurosamente los requerimientos necesarios para el desarrollo de competencias disciplinares, siendo estas fundamentales en el momento de enseñanza y aprendizaje de la astronomía. Así mismo cuenta con recursos tecnológicos de la Información y la Comunicación (**TIC**), ya que la implementación de la tecnología en la educación puede verse como una herramienta de apoyo que facilita la comprensión de los temas, no viene a sustituir al maestro, sino pretende ayudarlo para que el estudiante tenga más elementos (*visuales y auditivos*) enriqueciendo el proceso de enseñanza aprendizaje (María del Pilar Sepúlveda Ruiz, 2007).

Las actividades planteadas pueden desarrollarse en forma secuencial con el fin de ir conociendo uno de los cuerpos que se encuentran en el universo como son las Galaxias, su morfología, y sus comportamientos físicos. El tiempo estipulado para el desarrollo de las actividades es de 2 a 3 sesiones de una clase, cada una mínimo de dos horas, teniendo en cuenta que el docente puede sugerir tareas o actividades adicionales.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL Contribuir a la enseñanza de las nuevas temáticas de la astronomía por medio del estudio de uno de los cuerpos que se encuentran en el universo como son las galaxias y sus actividades físicas como la cinemática rotacional.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Presentar una propuesta metodológica de enseñanza de la descripción física de las galaxias, teniendo en cuenta el aprendizaje basado en la solución de problemas.
- Conocer como se realizó la clasificación morfológica de las galaxias dependiendo sus características físicas.
- Dar a conocer a los estudiantes las nuevas tecnologías como herramientas útiles, para un proyecto de investigación.
- Realizar las diferentes gráficas sobre la curva de rotación, con datos observacionales hallados en artículos científicos.
- Comprender la conexión de materia oscura con la curva de rotación de las galaxias.



Figura 6.2: modulo

6.2. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA ENSEÑANZA:

El modelo pedagógico propuesto para el desarrollo de este módulo es por medio del **Aprendizaje Basado en Problemas ABP** (Commons, 2008), este modelo se presenta como un método de aprendizaje en donde el punto de partida de la adquisición de los conocimientos es la formulación y solución de problemas. Está es una metodología centrada en el aprendizaje, en la investigación y reflexión que siguen los estudiantes para llegar a una solución ante un problema planteado por el profesor, lo cual permite que los estudiantes se involucren de forma activa en el desarrollo de su propio aprendizaje.

El aprendizaje basado en problemas es un modelo didáctico que permite a los estudiantes que se involucren de forma activa en el desarrollo de su propio aprendizaje, Barrows (1986) define al **ABP** como *Un método de aprendizaje basado en el principio de usar problemas como punto de partida para la para la adquisición e integración de los nuevos conocimientos*. En esta metodología los protagonistas del aprendizaje son los propios estudiantes, que asumen la responsabilidad de ser parte activa en el proceso solucionando colaborativamente dicho problema, siendo el docente un facilitador o guía de este proceso, sin utilizar la lección magistral completa u otro método para transmitir ese temario (Commons., 2008).

El objetivo principal planteado por Howard Barrows (1996) en este modelo son: adquisición de conocimiento que pueda ser susceptible de ser utilizado, desarrollo de un aprendizaje autónomo y desarrollo de habilidades para la resolución de problemas. Es importante señalar que las actividades propuestas en este módulo tiene la pretensión de desarrollarse teniendo en cuenta el ABP, aunque algunas actividades tienden a ser instruccionales, el docente debe indicar preguntas a los estudiantes que permitan cuestionarse y encontrar ellos mismos una ruta de entendimiento, el docente debe ser más un facilitador o guía del aprendizaje (Commons. 2008).

MARCO TEÓRICO

6.3. ¿Qué es una Galaxia?

Las galaxias son sistemas que hacen parte fundamental en la construcción del Universo. Algunos de ellos son de estructura muy simple, ya que están compuestas de gas neutro. Por otro lado, otros son sistemas complejos, contruidos a partir de muchos componentes como; estrellas, gas (principalmente Hidrógeno neutro) e ionizado, polvo, nubes moleculares y los rayos cósmicos.



Figura 6.3: Galaxia Espiral M81. Tomado de NASA, Adler, T.Chicago, Wesleyan, JPL-Caltech. IBEX (Explorador de la Frontera Interestelar)

6.3.1. ¿Quién las observo por primera vez?

Hacia el siglo *XVIII* *Charles Messier* con tan solo 14 años empezó a mostrar un gran interés por la Astronomía, cuando solía mirar encantado las estrellas, en una de sus observaciones en el año 1744, el gran cometa de seis colas, catalogado por Dirk Klinkenberg con el curioso nombre: *C/1743X1* el cual cruzó el firmamento, desde este momento el interés de Charles por la Astronomía se despertó, y su pasión mostró pronto los primeros síntomas de querer convertirse en vocación (Yave, 1998), Messier comenzó sus aventuras cazando cometas.

En su búsqueda observo que habían figuras borrosas que no eran cometas, estas Nebulosidades fueron escritas en su primer Catálogo de Nebulosas¹ de la historia, fue publicado en 1784 y contenía 103 objetos, de los cuales 39 corresponden a Galaxias.

6.3.2. ¿Cómo las clasificaron?

Después algunos astrónomos como William Herschel, Christian Doppler y William Parsons continuaron con este estudio y en el año 1936 Edwin Hubble realiza una clasificación de las Galaxias dependiendo su morfología. Uno de los primeros esquemas de clasificación de Galaxias dependiendo de su estructura morfológica fueron de carácter descriptivo, como se observa en la Figura 6,4, realizado por Wolf en 1908.

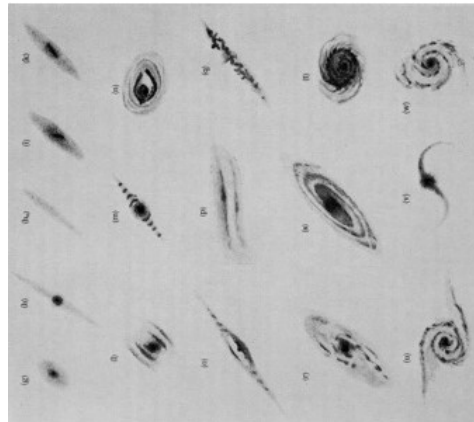


Figura 6.4: Primer esquema de clasificación, en el que se distingue entre Galaxias y Nebulosas, cuya descripción es cualitativa. Tomado de [8]

El siguiente sistema general fue realizado por Edwin Hubble (1936), en este hay una distinción entre elípticas, espirales con o sin barra e irregulares. Los criterios de clasificación que se utilizaron tienen una correlación con características astrofísicas como la relación núcleo a disco, el contenido de gas, el espectro (Huchra, 2007).

El esquema de clasificación que se ve en la Figura 6,5 se denomina Secuencia Hubble, divide las Galaxias en regulares e irregulares, en las regulares distingue dos tipos principales: elípticas

¹Sus nombres empiezan por la letra M en honor a Messier. La galaxia Andrómeda pertenece a este catálogo y se denomina M31

y espirales. Las galaxias espirales se dividen en dos secuencias, espirales normales y barradas.

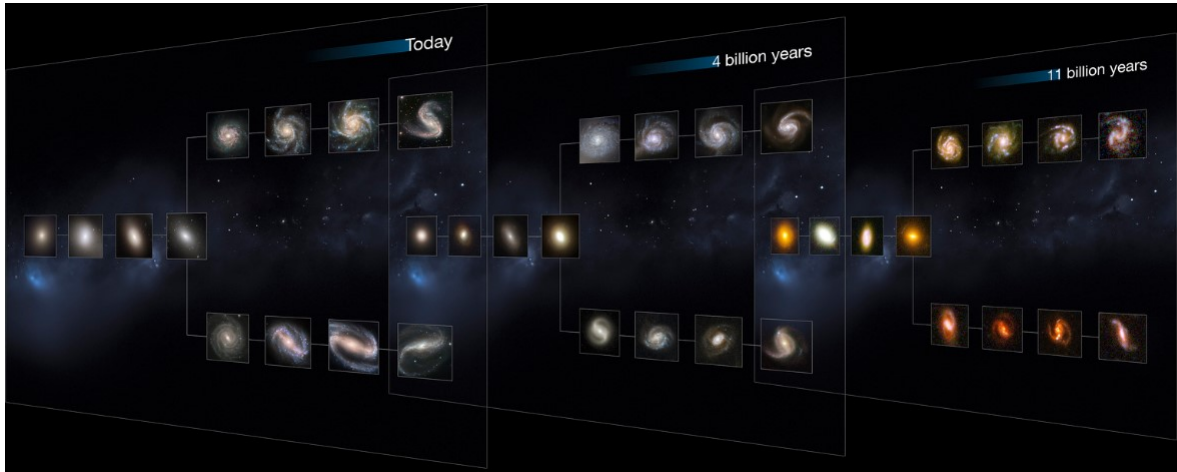


Figura 6.5: Secuencia Hubble, publicado en (1936). Tomada de www.flickr.com/photos/gsf/9524854754, muestra como ha evolucionado el universo desde hace 11 Billones de años

6.3.3. Galaxias Elípticas

Las galaxias elípticas aparecen en el cielo como una concentración de estrellas de forma elíptica, en el que la densidad cae de manera regular como si se fuera hacia a fuera. Las elípticas se diferencian una de otras por su forma, se clasifican como $E0$, $E1$, . . . , $E7$. Por los ejes mayor y menor de una galaxia elíptica son a y b , se define como dice la ecuación 6,1.

$$q = 10\left(1 - \frac{a}{b}\right), \quad (6.1)$$

siendo a el diámetro del eje mayor y b el diámetro del eje menor de la proyección del elipsoide en el plano del cielo. Así, una galaxia ($a = b$) es una galaxia de forma circular, se clasifica como $E0$, siendo $E7$ la mayor como se ilustra en la Figura 6,6. Inicialmente se pensaba que eran elipsoides de revolución, siendo el eje de simetría el de rotación, luego se vio que su giro era demasiado lento y era incapaz de producir la *excentricidad de la elipse* en su proyección [8].

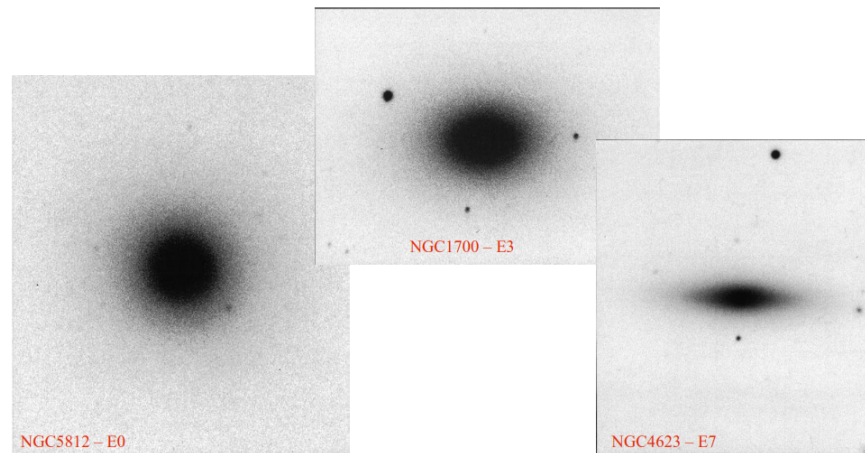


Figura 6.6: Galaxias Elípticas, clasificadas dependiendo de que tan elipsoidales son $NGC5812 - E0$, $NGC1700 - E3$, $NGC4623 - E7$. Tomado del texto [1]

6.3.4. Galaxias Espirales

Después de las elípticas, la secuencia Hubble se divide en dos ramas: *Normales* y *Barradas*. La diferencia es la aparición de una barra (estelar) a lo largo de un diámetro. El problema es que no siempre es evidente la barra y depende en general del tipo (escala, color) de la placa fotográfica que se utilice para identificarlas (*Serrano, 2010*).

Galaxias Espirales Normales y Barradas

Las galaxias espirales en la secuencia Hubble, Figura 6,5, son denotadas con la letra *S*, tienen tres componentes como se ilustra en la Figura 6,7 que las caracteriza, los cuales son:

1. El Bulbo Galáctico
2. Su Disco Galáctico
3. Halo Galáctico

Clasificación de las Galaxias Espirales

Las galaxias espirales se dividen en dos grandes grupos: *espirales normales* (*S*) y las *espirales barradas* (*SB*), se diferencian por la presencia de una barra, que sale desde el bulbo en dirección

que tienen una (*barra*), se clasifican como SB. Estas también se sub-clasifican por la separación de los brazos, por ejemplo la Vía Láctea es una galaxia SABbc. La *Secuencia Hubble* fue modificada y expandida por otros astrónomos, como Allan Sandage, Gerard de Vaucouleurs y Sidney van de Bergh en el año 1959, en donde introdujo un tipo intermedio de barras (SAB). Estas galaxias son espirales donde la región central es alargada en forma de un tipo de distorsión oval, y son subdivididas de la misma manera que las espirales S o SB en *a, b y c*[8].

6.4. Uso de las TICS

El proceso de enseñanza – aprendizaje ha tenido cambios en las herramientas de tipo material, es decir, la sustitución parcial del uso de los libros de texto por el ordenador, manteniendo la estructura de la clase tradicional. La enseñanza está centrada en la transmisión de los mismos o similares contenidos, alternando el uso de los recursos que ofrece la red con el libro de texto. Desde estas prácticas, la incorporación de las **TIC** no ha supuesto lo que Hargreaves (2003), Pérez Gómez (2007) y Sancho (2006) defienden, y Pedró y Benavides (2007) hacen alusión:



Figura 6.8: Imagen tomada del texto: <https://gamification-e-learning.com>

Las TIC deben suponer un replanteamiento general de qué y cómo deben aprender los estudian-

tes, o cuál debe ser la función docente o de la escuela en la sociedad de la información (María del Pilar Sepúlveda Ruiz, 2007). Uno de los cambios más destacados a lo largo del estudio, por la mayoría de los informantes, es que el tiempo ha cambiado. Para el alumnado, por ejemplo, *el tiempo pasa más rápido* por la motivación en el uso del medio. Para el profesorado el trabajo desarrollado con el libro de texto está determinado, más acotado, porque la información está presentada de modo lineal: empieza en un punto y acaba en otro. No da opciones al alumnado de desviaciones de lo que se trata en determinado momento; todo está medido y perfilado.

Es un potente modo de control de la información que ejercían hasta ahora tanto la institución como el profesorado, que se siente seguro en su labor al dominar los contenidos previamente seleccionados que aparecen en los textos, sustentando en ello buena parte de su autoridad moral en su quehacer profesional (Apple, 1986, 1992; Blanco, 2000; Martínez Bonafé, 2002).

6.5. Herramienta Interactiva (SLOAN DIGITAL SKY SURVEY)

El SLOAN³ es una página interactiva creada por la Nasa con la finalidad de dar la oportunidad a las personas de aprender y explorar el universo por medio de mapas tridimensionales detallados, con profundas imágenes de múltiples colores y espectros de más de tres millones de objetos astronómicos. Adicionalmente tiene propuestas para la educación desde diferentes niveles.

Algunos de los servicios que ofrece son:

- Acceso a base de datos
- Educación
- Resultados científicos

Esta herramienta sera fundamental para el desarrollo de algunas de las actividades planteadas, ya que por medio de ella los estudiantes podrán ver las imágenes de los cuerpos que componen el universo, específicamente las galaxias.

³Por medio del siguiente link podrá ingresar a la página del SLOAN [http : //www.sdss.org/](http://www.sdss.org/)

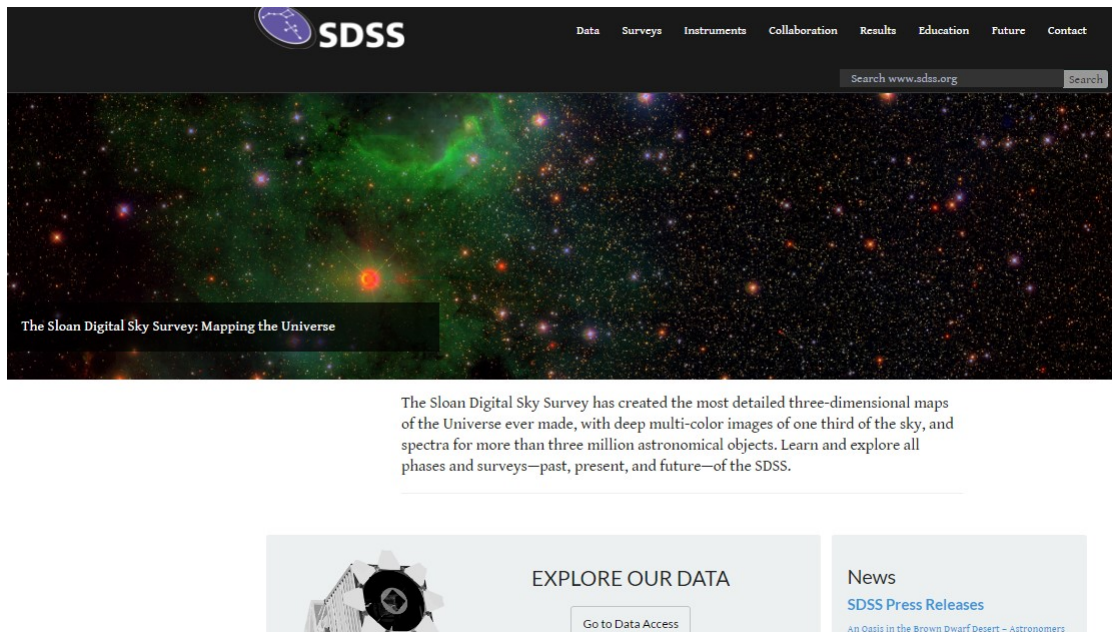


Figura 6.9: Página principal del SLOAN DIGITAL SKY SURVEY

6.6. ACTIVIDAD 1


Ingresa a la página del SLOAN, después de interactuar con ella ingresa a uno de los servicios “Educación”, en la parte inferior derecha encuentra el link “SDSS: Data for All” y el botón “Exlore SkyServer”, aquí llegará a una nueva página, debe buscar el link de Educación para docentes y en básico, encontrará varios temas para realizar (Busque el de Galaxias).

Mire las siguientes galaxias, observe sus características como: color, forma, estructura y ordénelas en grupos dependiendo las características que tienen en común. Utilice la herramienta **Get Fields** para obtener diferentes campos y buscar cada galaxia, ya que las imágenes del SDSS están ordenados por regiones del cielo.

La siguiente lista muestra los campos/área de cada galaxia. Haga clic en el número de campo de cada galaxia para ver la imagen. Debido a que las galaxias tienden a agruparse, algunos de los marcos tienen más de una galaxia grande pero en todos los demás cuadros, solo hay una Galaxia.

Use the Get Fields tool to look up each galaxy. SDSS images are sorted by regions of the sky, into runs, camera columns (camcols), and fields. The list below shows what run/camcol/field area each galaxy is in. Click on each galaxy's field number to see a picture of the field. Because galaxies tend to cluster together, some of the frames have more than one large and interesting galaxy, but in all the other frames, the largest galaxy should be obvious.

Run	Camcol	Field
752	1	244
2662	4	243
752	1	331
1737	6	11
756	4	198
2738	2	196



A unique SDSS galaxy

Figura 6.10: Actividad 1

Pregunta 1: ¿Las Galaxias tienen características en común, Cuales?

Pregunta 2: Trate de combinar las características de cada sistema y piense ¿ Cómo clasificaría las Galaxias de acuerdo a las fotografías que esta observando?

6.7. ACTIVIDAD 2

En esta actividad se encuentran las mismas galaxias que se vieron al inicio en la Figura 6,10, en este caso, usted tendrá que clasificar las galaxias dependiendo el diagrama de clasificación de Hubble:

Pregunta 3: Compare el sistema de clasificación Hubble con el que usted realizó ¿Son similares? ¿Qué diferencias encuentra?

6.7.1. Diagrama del Tenedor de Hubble

Hubble vio a muchos de los mismos tipos de galaxias que usted vio en las imágenes, pero no eran tan claras ya que no había la misma tecnología en la época (*Fukugita, 1996*).

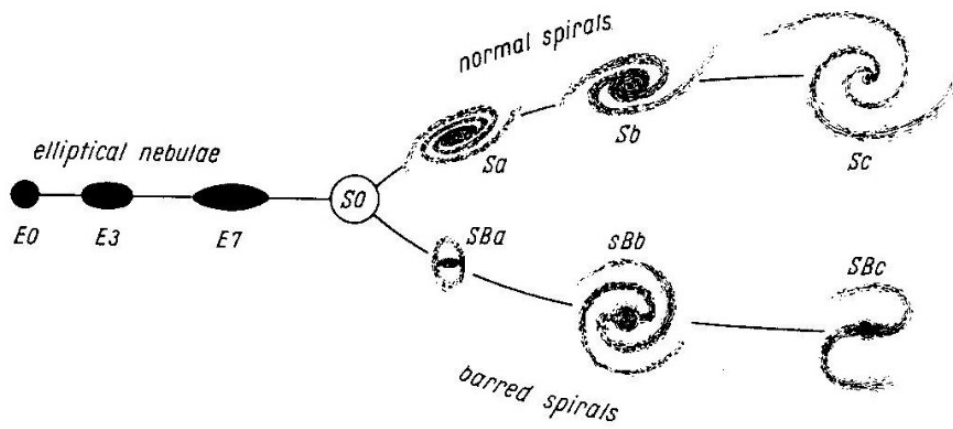


Figura 6.11: Diagrama de tenedor Hubble [8]

En la siguiente Figura 6,12 usted tendrá que clasificar las galaxias como temprano (E, S0, Sa o SBA) o tardías (Sb o SBA, Sc o SBc) dependiendo la sintonía de tenedor de Hubble, luego escribe las galaxias en la tabla:

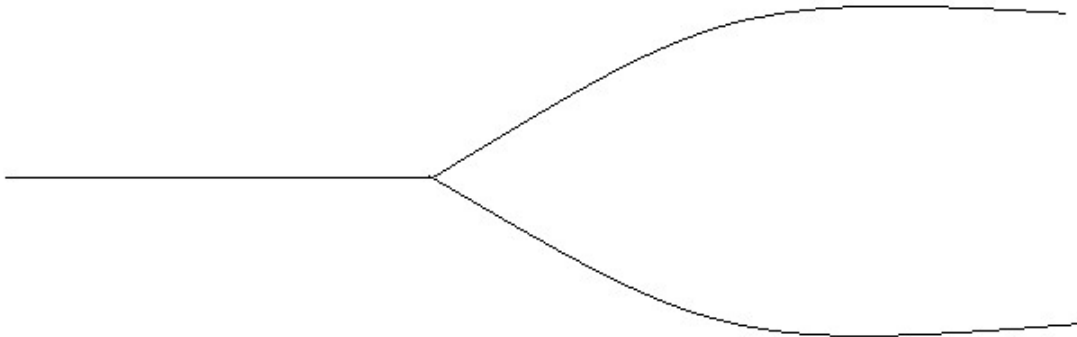


Figura 6.12: Sintonía Hubble

ELIPTICAS	LENTICULARES	ESPIRALES	ESPIRALES BARRADAS	IRREGULARES

Figura 6.13: Tabla de Clasificación de Galaxias

6.8. ACTIVIDAD 3

Utilice la herramienta de navegación *DR12* para buscar un par de galaxias en el Cluster de galaxias Abell 957. Ingrese a la herramienta haciendo *click* en el enlace, que le llevará a la ubicación de Abell 957.

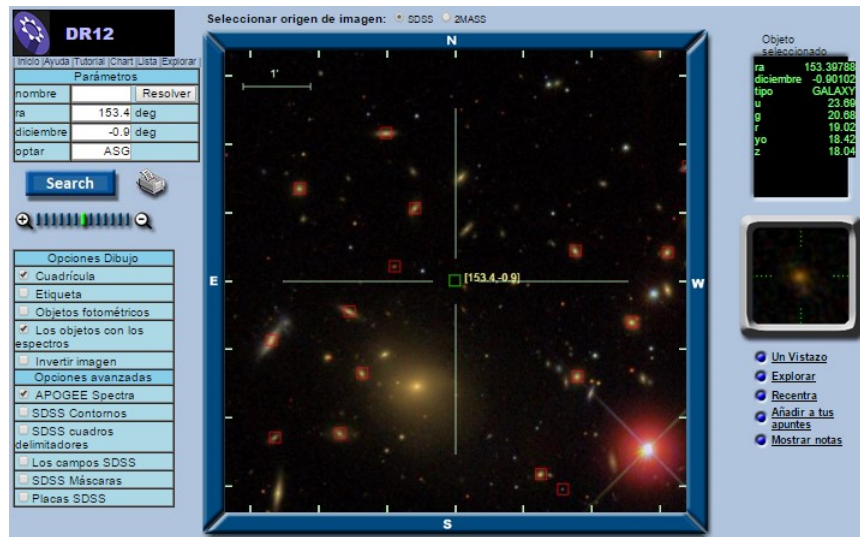


Figura 6.14: Visualizar

Haga click en (Obtener imágenes), puede acercar o alejar con el signo + ó - así podrá ver todo el cúmulo. Los datos básicos de cada imagen aparecen a la derecha, como se ilustra en la Figura 6,14.

Piense cómo puede saber cuáles galaxias son parte de Abell 957 y cuáles son otras Galaxias que sólo están a diferentes distancias en la misma parte del cielo. Haga click en las galaxias que usted crea que son parte del cúmulo, espirales y elípticas.

Pregunta 4: ¿Cómo son estas galaxias, similares o diferentes? Escriba que las hace similares o que las hace diferentes.

6.8.1. ESPECTROSCOPIA ESTELAR:

La espectroscopia estelar, es una técnica experimental empleada principalmente para conocer la composición química y el movimiento de los cuerpos del espacio interestelar como: Estrellas, galaxias, Nebulosas, cúmulos estelares, cometas, planetas, etc.

Esta técnica es empleada para conocer las características físicas de los astros como su velocidad radial, presión, temperatura, a partir de la radiación emitida o absorbida [4], la espectroscopia se constituye como una gran herramienta para la astronomía contemporánea; ya que con esta se pueden determinar de forma detallada las variables físicas como la longitud de onda electromagnética asociada a cada uno de los espectros para relacionarla con un color determinado[5].

Las galaxias y estrellas por ejemplo, son analizadas a partir de sus líneas espectrales y en cuanto a su movimiento se pueden analizar a partir del efecto Doppler [8] Este procedimiento tienen un fundamento teórico que vienen de los estudios iniciales de Plank (1900) al afirmar que la emisión de energía tan solo podía hacerse de manera discontinua, en forma de unos pequeños paquetes los cuales denomino; *Cuantos de energía*, esta energía solo dependía de la frecuencia de radiación, estas dos variables físicas se relacionan mediante la ecuación:

$$E = h \frac{c}{\lambda}, \quad (6.2)$$

En donde h es considerada como *La constante universal de Plank* y tiene un valor de $6,6260693(11) \times 10^{-34} J \cdot S$, C es la velocidad de la Luz y λ es la longitud de onda de la radiación [5]. Esta afirmación de Planck fue más adelante ampliada por Einstein (1903) y luego empleada por Bohr (1913) para la interpretación del espectro atómico, de aquí se puede afirmar que los átomos o moléculas tan solo pueden estar en determinados niveles de energía, de esta manera una de las

tareas de la espectroscopia es obtener los posibles niveles de energía o estados característicos de un sistema atómico o molecular a partir de las frecuencias e intensidad de absorción o emisión, medidas en el espectro [5].

6.8.2. El Espectro

El espectro es la imagen o figura gráfica que representa un determinado sistema físico, es la huella que caracteriza dicho sistema, el espectro se representa como una distribución de energía que da información acerca de la radiación electromagnética que emite o absorbe una sustancia, este puede ser definido como *La distribución de intensidad de la radiación electromagnética, emitida o absorbida por una muestra de sustancia, en función de la longitud de onda (frecuencia) de dicha radiación* (Huchra J. P., 1992). Esta formado por un continuo y unas Líneas. Superpuestas al continuo están las rayas o líneas del espectro, pueden ser de emisión o absorción, como indica la Imagen estas abarcan una región de frecuencias muy reducida, como consecuencia de la naturaleza cuántica de los niveles energéticos de los átomos o moléculas (*Battaner, 1999*).

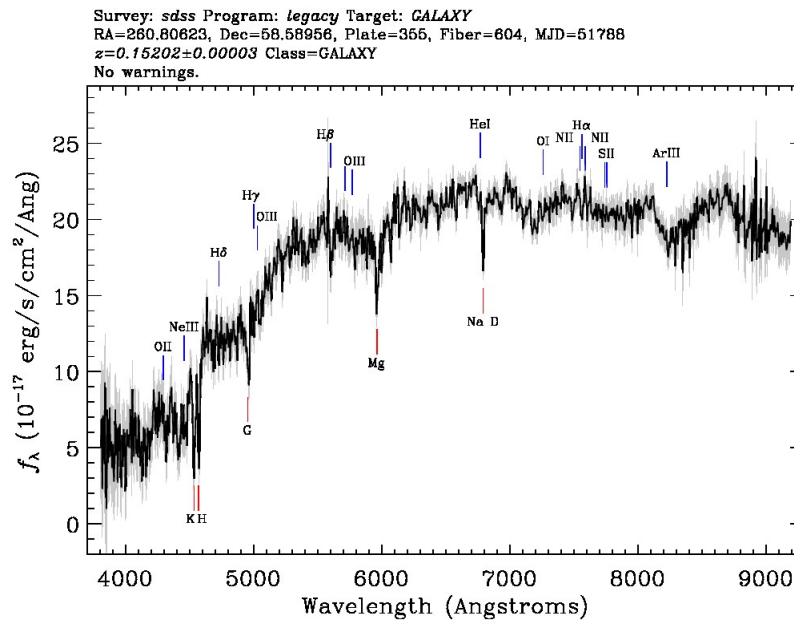


Figura 6.15: Espectro

Espectro de una galaxia, donde se encuentra los datos de ubicación con respecto al plano galáctico.

Tomado de [16]

6.8.3. CORRIMIENTO AL ROJO (REDSHIFT)

Llamado así por el físico Austriaco *Christian Doppler*, quien investigo este fenómeno con Ondas sonoras. Después en 1848 *Hippolyte Fizeau* descubrió el mismo fenómeno en el caso de ondas electromagnéticas [5].

El corrimiento al rojo, es un fenómeno, definido como un incremento en la longitud de onda de radiación electromagnética recibida por un detector comparado con la longitud de onda emitida por la fuente. El decrecimiento en la longitud de onda es llamado corrimiento al azul, o el aumento en la longitud de onda es llamado corrimiento al rojo. La letra z indica el corrimiento en la longitud de onda del espectro [5].

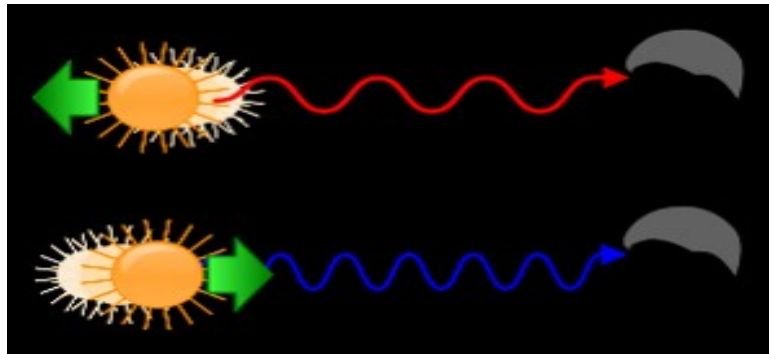


Figura 6.16: Corrimiento Doppler . Tomado de www.taringa.net/posts/ciencia-educacion

La expresión matemática 6,3 se utiliza para determinar el corrimiento espectral:

$$z = \frac{\lambda_{observada} - \lambda_{emitida}}{\lambda_{emitida}} \quad (6.3)$$

6.9. ACTIVIDAD 4

En el siguiente cuadro, se encuentra el espectro de 10 galaxias diferentes, para ingresar al **Explorador de Objetos** y observar los espectros, debe hacer click en el ID de las siguientes galaxias:

Object ID	REAL ACADEMIA DE BELLAS ARTES	Diciembre
1237655560403878129	248.920	0,331
1237662225706123901	254.768	16.715
1237648704068649509	248.295	-0,213
1237648704068518498	248.051	-0,304
1237655550207197707	248.275	-0.189
1237648673997127724	248.064	-0.050
1237662306744664864	256.022	16.764
1237668336864788995	249.860	11.211
1237662341631247030	256.384	17.304
1237662635841552623	246.455	6.336

Figura 6.17: Valores de z

SDSS J233723.97 + 002.330,2

Buscar el nombre común

Propiedad	Valor
SDSS Object ID	123765540839939277
Galaxia	GALAXIA
RA, Dec	Coordenadas galácticas (l, b)
Dígitos	384.34991, 0.39173
Objeto	23: 37: 23.97, 02: 23: 30.21
l, b	87.02726, -87.22892

Imaging

bandas PSF_FLUX_INTER DEBLENDED AT EDGE
ESTRUCIONARIO BINNED1 INTERPCOSMIC_RAY
NCFETRO NINO

magnitudes				
	u	g	r	z
	19.75	15.76	15.30	14.93
incertidumbres magnitud				
	err_u	err_g	err_r	err_z
	0.51	0.02	0.05	0.01

MJD	modo	otras observaciones	parentID	Nohid	extinction_r	PetroRad_r
53235	PRIMARIO	10	123765540839939270	0	0.11	68.31 ± 1.000,000
MJD-Fecha	Photoz (método iD-airbo)					Galaxy Zoo 1 morfología
10/10/2004	0.000 ± 0.0403					-

Identificaciones cruzadas [Mostrar](#)

Spectra óptico SpecObjID = 433580345659362816 [espectro interactivo](#)

Espectro interactivo

Propiedad	Valor
SDSS	SDSS
date	GALAXIA
Comentario al rigo (z)	0.000
Comentario al rigo de error	0.0004
bandas de comentario al rigo	DE ACUERDO
encuesta	z8s
programaria	leg800
primaria	1
Otras especificaciones	1
tipo de fuente	GALAXIA
desplazamiento de velocidad (km/s)	40.11
velocidad error	40.955
targeting_flag	GALAXIA
pass	SS

Figura 6.18: Espectros encontrados en el SSDS [16]

Encuentra el desplazamiento Doppler de las galaxias, que se han observado en las actividades anteriores, después de estar en la Herramienta **DR12**, dele click en **espectro interactivo** para

que pueda observar más grande el espectro, con ayuda del cursor señale la línea que va a utilizar para hallar el desplazamiento Doppler.

Después de hallar el z *REDSHIFT* de las galaxias, escriba el valor correspondiente en la siguiente tabla:

GALAXIA	REDSHIFTS

Figura 6.19: Tabla de Ubicación del Redshift

Pregunta 5: ¿ Las galaxias tienen el mismo corrimiento Doppler? ¿Porque?

6.9.1. Cálculo de la masa a través de la Luminosidad

La primera aproximación de la distribución de masa de una galaxia espiral se obtiene de la distribución del brillo superficial (depende fundamentalmente de la distancia a la que nos encontramos de un objeto)[5]. Esta distribución se obtiene a través de cámaras CCD, que registran la potencia emitida por cada punto de la galaxia (brillo superficial), luego se presenta a través de mapas con líneas continuas o Isofotas. Este mapa de isofotas muestra como varia el brillo superficial de una galaxia conforme aumenta la distancia de su centro. como se ilustra en la Figura 6,20

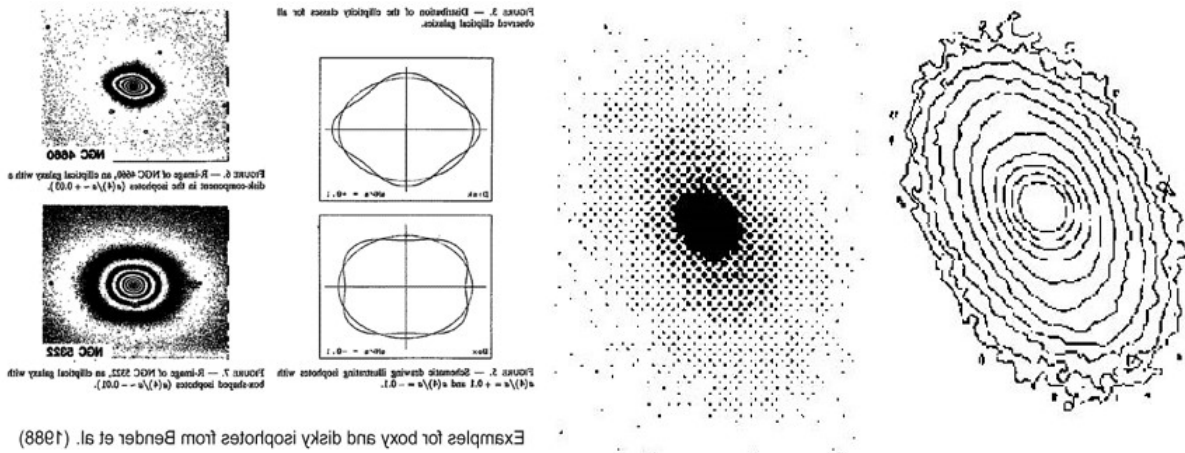


Figura 6.20: Análisis fotométrico, utilizan imágenes adquiridas con placa fotográfica o detectores CCD, así se establece la variación de la luminosidad a lo largo del diámetro de la galaxia y construir isofotas⁴, la isofota más alejada es la que encierra la mayor cantidad de radiación emitida, Tomado de [20]

6.10. ACTIVIDAD 5

Realice las gráficas de brillo superficial en una hoja de Excel con los datos que encuentra a continuación, luego guarde la hoja con su nombre.

Pregunta 5: ¿ Las gráficas de las galaxias espirales tienen el mismo comportamiento que las galaxias elípticas, Si no porque?

Pregunta 6: ¿ Qué tipo de gráficas obtuvo, porque cree que tienen ese comportamiento?

Perfil Brillo Superficial Galaxia Espiral NGC1417		Perfil Brillo Superficial Galaxia Espiral NGC1620	
Radio (kpc)	$\mu(r)$ mag/arcsec ²	Radio (kpc)	$\mu(r)$ mag/arcsec ₂
0	19	0	17,5
2	20	2	19,5
4	20,5	4	20,5
6	21	6	21
8	21	8	21,2
10	21,3	10	21,5
12	21,5	12	22
14	21,8	14	22,3
16	22	16	22,4
18	22,2	18	22,7
20	22,3	20	23
22	22,5	22	23,1
24	22,7	24	23,3
26	23	26	23,7
28	23,3	28	24
30	23,5	30	24,5
32	23,8	32	24,7
34	24	34	24,8

Figura 6.21: Gráficas de Galaxias Espirales

Perfil Brillo Superficial Galaxia Elíptica VCC1104		Perfil Brillo Superficial Galaxia Elíptica VCC1191	
Radio (kpc)	$\mu(r)$ mag/arcsec ₂	Radio (kpc)	$\mu(r)$ mag/arc:
0	19	0	19,5
1	19,5	1	20
2	19,9	2	20,5
3	20,1	3	21
4	20,3	4	21,5
5	20,4	5	22
6	20,7	6	22,5
7	20,9	7	23
8	21,1	8	23,4
9	21,3	9	23,8
10	21,7	10	24
12	21,9	12	24,2
14	22,2	14	24,4
16	22,4	16	24,6
20	22,7	20	25
25	23,5	25	25,5
30	24,5	30	26
35	26	35	26,5
40	27,5	40	27
45	27,7	45	27,5
50	28,3	50	28
55	28,7	55	28,5
60	29	60	28,8

Figura 6.22: Gráficas de Galaxias Elípticas

6.10.1. Curva de Rotación

La curva de rotación es determinada por medio de la velocidad de rotación de los elementos de una galaxia (gas, estrellas, etc), en función de la distancia del centro de la galaxia [17]. Históricamente, las primeras mediciones de la curva de rotación fueron obtenidas por *Pease* en 1916 – 1918 para la galaxia *M104* [12]. *Brandt* en 1960 obtuvo una curva de rotación de velocidades en un esfuerzo para determinar la distribución de masa de galaxias espirales, donde realizó una parametrización empírica de la curva de rotación ajustándola a sus datos observacionales. La curva de rotación es en general una familia de curvas dada por:

$$V_{rot}(R) = \frac{V_{max}}{(R/R_{max})} \frac{1}{[\frac{1}{3} + \frac{2}{3}(R/R_{max})^n]^{3/2n}}, \quad (6.4)$$

donde V_{max} es la máxima velocidad de rotación, R_{max} es el radio en que la velocidad máxima ocurre, n es un factor que indica qué tan rápido la curva se vuelve Kepleriana; esto impone que n tiene un cierto número de valores permitidos $n = 3$ y $n = 3/2$.

6.11. ACTIVIDAD 6

En el archivo que creo de Excel, ingrese la relación 6,4 y realice la curva de rotación teórica, por medio de la parametrización creada por *Brandt*:

Pregunta 7: ¿ Qué tipo de curva obtuvo?¿ Decrece o se mantiene constante en algún punto?

Pregunta 8: Al cambiar el parámetro n , la curva de rotación cambia, o tiene el mismo comportamiento.

Curva de Rotación Galaxia Espiral M101		
V/Vmax	R/Rmax	y
0	0	
0,05	0,2	
0,1	0,4	
0,15	0,6	
0,2	0,8	
0,25	1	
0,3	1,2	
0,35	1,4	
0,4	1,6	
0,45	1,8	
0,5	2	
0,55	2,2	
0,6	2,4	
0,65	2,6	
0,7	2,8	
0,75	3	
0,8	3,2	
0,85	3,4	
0,9	3,6	

Figura 6.23: Tabla datos para hallar la curva Brandt.

6.11.1. Curva de rotación de la Vía Láctea

:

Modelaremos el movimiento Galáctico como un movimiento Kepleriano, suponiendo que la masa M de la Galaxia se encuentra toda en el centro de la misma; entonces la velocidad circular de un objeto a una distancia R podría calcularse al igualar su aceleración gravitacional con su aceleración centrípeta, obteniendo la relación [25]:

$$V_c \propto \frac{1}{\sqrt{R}} \tag{6.5}$$

En la siguiente Figura 6,24 , se considera que un objeto (o gas en nuestro caso) se encuentra en una órbita interior a la del Sol, y separado por un ángulo ℓ de la línea que une al Sol con el centro de la Galaxia, donde \mathbf{CG} representa el centro de la Galaxia, R es la distancia del Sol al centro de la Galaxia y ω es la velocidad angular del Sol [24].

Según el modelo de Rotación Galáctica 3.1.9 la velocidad radial del gas está dada por la ecuación:

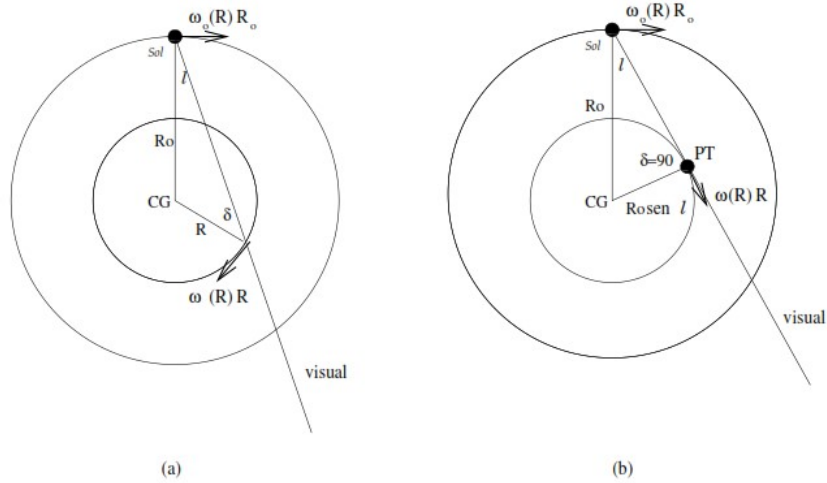


Figura 6.24: Modelo realista más simple para el disco galáctico, el Sol y todas las nubes HI están en órbitas circulares alrededor del centro galáctico. Tomada de (<http://www.cv.nrao.edu/course/astr534/HILine.html>) [26]

$$V_{radial} = (\omega - \omega_0)R \sin \delta, \quad (6.6)$$

En la Figura 6,24 se observa que esta velocidad radial es máxima cuando $\sin \delta = 1$, valiendo $\delta = 90^\circ$; esto implica que la línea visual es tangente a la órbita del gas, por lo tanto:

$$R = R_0 \sin \ell. \quad (6.7)$$

siendo ahora R la distancia **CG** al punto tangencial, **PT**, como se muestra en la figura 5.24, gráfica (b), considerando lo anterior la ecuación 3.36 puede escribirse como:

$$V_{max} = V_{PT} - V_{sol} = \omega R - \omega_0 R, \quad (6.8)$$

donde V_{max} es la velocidad más alta que se puede observar sobre la línea de la visual dada y que corresponde a la frecuencia más baja medida, mientras que V_{PT} es la velocidad del gas en **PT**, siendo la que se pretende determinar para crear la curva de rotación de la Galaxia. Despejando de la ecuación 6,8 se obtiene:

$$V_{PT} = \omega R = V_{max} + \omega_0 R, \quad (6.9)$$

Los valores para la velocidad circular del Sol, $\omega_0 R_0$ y la distancia al centro Galáctico, R_0 , son:

$$\omega_0 R_0 = 220 \text{ Km/s} \tag{6.10}$$

$$R_0 = 8,5 \text{ Kpc} = 2,6 \times 10^{17} \text{ Km} \tag{6.11}$$

6.12. ACTIVIDAD 7

Teniendo en cuenta este modelo usado para hallar la curva de rotación de una galaxia, revise los siguientes espectros los cuales indican la velocidad máxima de la emisión con velocidad relativa al **LSR**⁵, esta velocidad ha sido corregida por corrimiento Doppler debido al movimiento local del Sol y la Tierra.

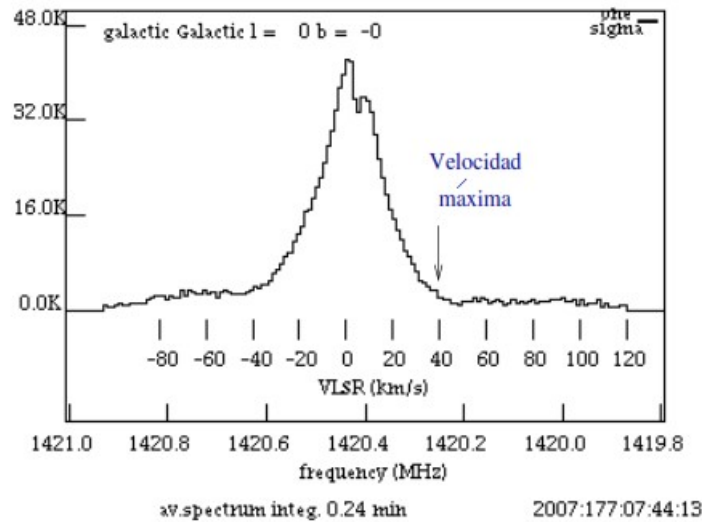


Figura 6.25: Espectro con longitud del plano Galáctico $\ell = 0^\circ$ obtenido por Stan Kurtz durante el *XVIII* Verano de la Investigación Científica que organiza la Academia Mexicana de Ciencias, con la antena de 2,1m del CRyA. [25]

⁵Sistema Local de Reposo

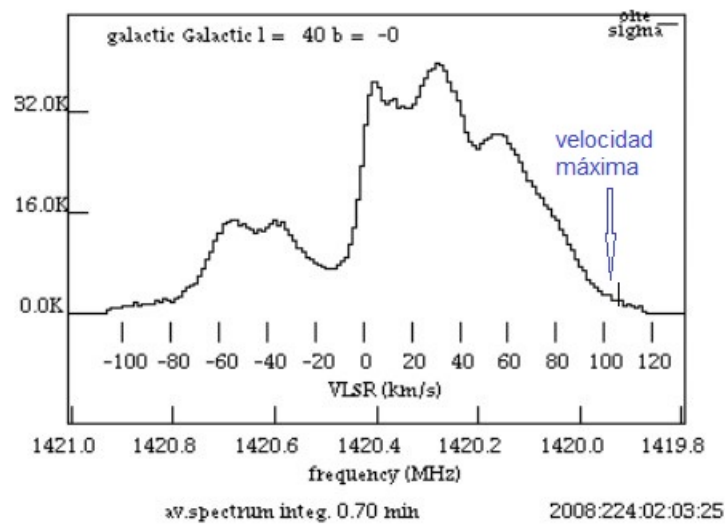


Figura 6.26: Espectro con longitud del plano Galáctico $\ell = 40^\circ$ obtenido por Stan Kurtz durante el *XVIII* Verano de la Investigación Científica que organiza la Academia Mexicana de Ciencias, con la antena de 2,1m del CRyA. [25]

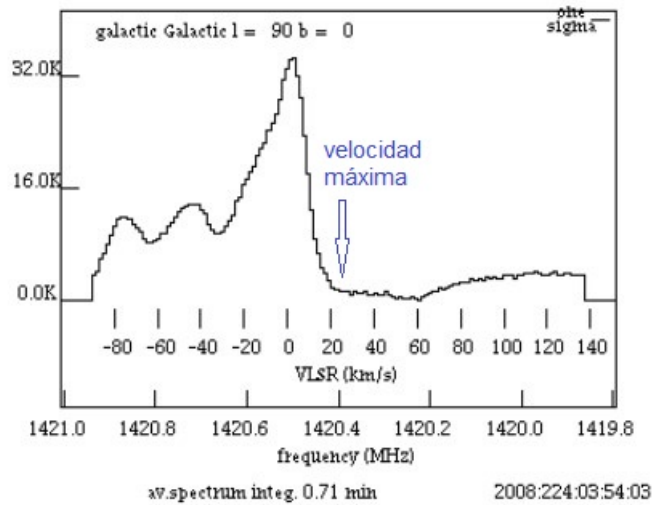


Figura 6.27: Espectro con longitud del plano Galáctico $\ell = 90^\circ$ obtenido por Stan Kurtz durante el *XVIII* Verano de la Investigación Científica que organiza la Academia Mexicana de Ciencias, con la antena de 2,1m del CRyA. [25]

Escribe en la siguiente tabla los resultados de la observación de la V_{max} , calcula los valores para la distancia R , la velocidad circular del Sol $\omega_0 R$ y la velocidad circular en el punto PT .

Longitud Galáctica (deg)	Velocidad máxima km/s	Valores calculados		
		Distancia R (kpc)	$V_{sol} = \omega_0 R$ km/s	V_{PT} km/s
0	40	0	0	40
10				
20				
30				
40				
50				
60				
70				
80				
90				

Figura 6.28: Datos Calculados

Al reemplazar los datos obtenidos en la ecuación 6,9, se puede conocer el valor de V_{PT} para crear la curva de rotación de la Vía Láctea. Ingrese los datos a Excel y realice la curva de rotación.

Pregunta 9: ¿ Qué tipo de curva de rotación obtuvo? ¿ Decrece o se mantienen constante en algún punto?

Pregunta 10: ¿ Esta curva de rotación cumple la relación $V_c \propto \frac{1}{\sqrt{R}}$?

Pregunta 11: ¿ Por qué creé que se presenta este comportamiento?

6.13. ACTIVIDAD 8

En el siguiente cuadro, dibuje la curva de rotación que obtuvo con los datos de la actividad 6 y la curva de rotación que obtuvo en la actividad 7.

Después de graficar las curvas, compárelas y responda las siguientes preguntas:

Pregunta 12: ¿Por qué creé que se presenta esta diferencia en los datos, si los métodos usados son para hallar la cantidad de masa que puede tener una galaxia?

Pregunta 13: ¿En su carrera como estudiante ha escuchado hablar sobre la *Materia Oscura*? ¿Qué conoce de esta temática moderna de la Astronomía?

Figura 6.29: Cuadro comparativo

6.14. ACTIVIDAD 9

A continuación se presenta una tabla que pretende ser una herramienta de evaluación de carácter cualitativo, frente al desarrollo de cada una de las actividades.

ACTIVIDAD	APRENDIZAJE LOGRADO	COMENTARIOS	SUGERENCIAS

Figura 6.30: Formato Evaluación